



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Roland Allmägi

**SEADME AIRMODUS A20 KOHANDAMINE
TAHMAOSAKESTE ARVU MÕÕTMISEKS
SISEPÕLEMISMOOTORITE HEITGAASIDES**

ADJUSTMENT OF AIRMODUS A20 FOR MEASURING THE
QUANTITY OF SOOT PARTICLES IN THE EXHAUST GASES
OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: Risto Ilves PhD
Retsensent:

Tartu 2018

LÜHIKOKKUVÕTE



Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Roland Allmägi		Õppekava: Tootmistehnika	
Pealkiri: Seadme Airmodus A20 kohandamine tahmaosakeste arvu mõõtmiseks sisepõlemismootorite heitgaasides			
Lehekülgi:45	Jooniseid:20	Tabeleid:	Lisasid:5
Õppetool: Biomajandustehnoloogiate õppetool			
Uurimisvaldkond: 4.14. Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine, T455 Mootorid ja ajamid			
Juhendaja: Risto Ilves PhD			
Kaitsmiskoht ja –aasta: Tartu 2018			
<p>Aina suurenev sisepõlemismootoritega sõidukite arv üle maailma tähendab samaaegselt suurenevat heitgaaside kogust meie atmosfääris. Viimastel aastakümnetel on aina rohkem uuritud heitgaase ning nende tekke põhjuseid. Heitgaaside ja nendes leiduvate ohtlike osakeste vähendamine on seetõttu tänaseks päevaks muutunud väga päevakajaliseks. Selleks, et heitgaase uurida ning nende ohtlike osakesi vähendada, on vaja meetmeid mõõtmaks heitgaase ja neis leiduvaid osakesi.</p> <p>Käesoleva töö eesmärk on kohandada Airmodus A20 osakesteloendur sisepõlemismootorite heitgaasides leiduvate tahmaosakeste arvu mõõtmiseks. Eesmärgi saavutamiseks uuriti erinevat sisepõlemismootorite ja nende heitgaasidega seotud kirjandust. Lisaks uuriti nii teoreetiliselt osakesteloenduri Airmoduse võimalusi kui ka viidi läbi erinevaid eelkatsetusi osakeste loendamise metoodikaga tutvumiseks.</p> <p>Töö eesmärk saavutati kohandatud mõõtmissüsteemi konstrueerimisega. Konstrueeritud süsteemi kasutamiseks töötati välja katsemetoodika, mille abil viidi läbi mootorikatse EMÜ mootorite katselaboris. Katsetulemusi analüüsiti ning võrreldi muude sarnaste katsetega, mis andsid kinnitust, et kohandatud katsemetoodika sobib soovitud eesmärgi täitmiseks. Kohandatud Airmodus A20 osakesteloendurit saab edaspidiselt kasutada erinevatel sisepõlemismootori katsetel, et mõõta heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu.</p>			
Võtmesõnad: biokütused, heitgaaside tahmasus, mootorikatsed, osakesteloendur,			

ABSTRACT

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Roland Allmägi		Speciality: Production engineering	
Title:Adjustment of airmodus A20 for measuring the quantity of soot particles in the exhaust gases of internal combustion engines			
Pages:45	Figures:20	Tables:	Appendixes:5
Department: Biosystems Engineering Field of research: 4.14. Industrial Engineering and Management, T455 Motors and propulsion systems Supervisor: Risto Ilves PhD Place and date: Tartu 2018			
<p>The growing number of vehicles fitted with internal combustion engines worldwide means an increasing amount of exhaust gases in our atmosphere. In recent decades, more and more research has been done on exhaust gases and their causes. Because of this the reduction of exhaust gases and their harmful particles has become the current topic. In order to properly study exhaust gas emissions measures to measure exhaust gases and their hazardous particles are needed.</p> <p>The goal of this bachelor thesis is adjust the Airmodus A20 particle counter to measure the number of soot particles found in the exhaust gases to be used at engine test in the engine's test laboratory at the Estonian university of life science. To achieve this goal, different literature on internal combustion engines and their exhaust gases was studied. Information on particle counting and the Airmodus A20 was gathered. In addition, particle counting experiments were conducted to gain knowledge of the methods of measuring particle numbers.</p> <p>The goal of this bachelor thesis was achieved by designing a custom measurement system for exhaust gas particle counting with the Airmodus A20. To test the new system a test methodology was developed and by which a combustion engine test was conducted in the engine's test laboratory at the Estonian University of Life Science. Test results were analyzed and compared with other similar experiments, which confirmed that the custom test method was suitable for the desired purpose. The experiment results were analyzed and compared with other similar experiments, which confirmed that the custom test method and the adjusted Airmodus A20 were suitable for counting particles in the exhaust gases of internal combustion engines.</p>			
Keywords: bio fuels, soot, engine test, particle counter			

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE	2
ABSTRACT	3
SISSEJUHATUS	5
1. SISEPÕLEMISMOOTORID JA NENDE HEITGAASID	7
1.1 Sisepõlemismootorid	7
1.2 Sisepõlemismootorite heitgaasid	10
1.3 Tahma ja tahkete osakeste arvu mõõtmine heitgaasides	16
2. AIRMODUS A20 OSAKESTE LOENDUR	17
2.1 Seadme kirjeldus	17
2.2 Tööpõhimõte.....	21
2.3 Mõõtmiste läbiviimine seadmega Airmodus A20	23
2.4 Seadme kohandamine tahmaosakeste arvu mõõtmiseks	24
2.5 Metoodiline juhend katsete läbiviimiseks Airmodus A20 osakestelenduriga.....	28
3. MOOTORIKATSETUSTE ANDMED JA NENDE ANALÜÜS.....	32
3.1 Katseülesehitus	32
3.2 Katseandmed	34
KOKKUVÕTE	36
KASUTATUD KIRJANDUS	37
LISAD	39
Lisa 1. Tabel 1.Survesüütega etalonmootori AVL tehnilised spetsifikatsioonid.	40
Lisa 2. Tabel 2. Koormuskatse andmed diislikütuse, HVO ja FAME kasutamisel	41
Lisa 3. Tabel 3. Regulaatori vooluhulga mõõtmistulemused erinevatel asenditel	42
Lisa 4. Regulaatori vooluhulga vähenemine vastavalt kraani asendile.	43
Lisa 5. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	44

SISSEJUHATUS

Meie teedel liikleb igal aastal aina rohkem sisepõlemismootoritega sõidukeid, mis kõik tekitavad vähesel või rohkemal määral heitgaase. Heitgaasides leidub erinevaid osakesi, millest mitmed on ohtlikud inimtervisele ja keskkonnale. Nende emissioonide paremaks mõistmiseks ja neid vähendavate meetmete kasutuselevõtuks on esmalt vaja viise heitgaaside mõõtmiseks.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on kohandada Airmodus A20 osakesteloendur sisepõlemismootorite heitgaasides sisalduvate tahmaosakeste arvu mõõtmiseks.

Eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgmised ülesanded:

1. Anda ülevaade sisepõlemismootoritest ja nende heitgaasidest
2. Kirjeldada airmodus A20 tööpõhimõtet ning selle sobivust tahmaosakeste arvu mõõtmiseks
3. Töötada välja katsetehnoloogia Airmodus A20 kasutamiseks tahmaosakeste arvu mõõtmiseks sisepõlemismootori heitgaasides
4. Viia läbi kontrollkatsetused katsetehnoloogia sobivuse kontrollimiseks.

Töö jaguneb kolmeks pea tükiks, millest kas esimest on kirjanduse analüüs ning kolmas tehtud mootorikatse kirjeldus ning katseandmete analüüs.

Töö esimene osa on kirjanduse analüüs, mis annab üldise ülevaate sisepõlemismootoritest, keskendused täpsemalt kolbmootoritele. Kolbmootoritest mainitakse Otto- ja diiselmootoreid, antakse ülevaade nende tööpõhimõtetes ja eripäradest. Peatüki lõpus käsitletakse veel Otto- ja diiselmootorite heitgaase ja neis leiduvaid erinevaid osakesi, sealhulgas ka tahkeid osakesi.

Teine peatükk käsitleb Airmodus A20 osakesteloendurit. Esmalt antakse ülevaade seadmest, selle tööpõhimõttest ja mõõtmiste läbiviimisest seadmega. Peatüki teine pool on töö autori kirjeldus tehtud sammudest, süsteemi projekteerimisel ja konstrueerimisel, mis võimaldaks kasutada Airmodus A20 osakesteloendurit heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu mõõtmisel. Peatükk lõppeb metoodilise juhendiga heitgaaside tahkete osakeste katseliseks mõõtmiseks Eesti maaülikooli mootorite katselaboris, autori poolt kohandatud Airmodus A20 osakesteloenduriga.

Viimane peatükk keskendub läbi viidud mootorikatsele, mille käigus kasutati Airmodus A20 osakesteloendurit, et mõõta mootorite katselaboris etalonmootori koormuskatsel heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu. Peatükis antakse ülevaade kasutatud katseseadmetest ja kirjeldatakse katseandmeid. Andmete analüüsimiseks võrreldakse tehtud tööd teiste sarnaste katsetega.

1. SISEPÕLEMISMOTORID JA NENDE HEITGAASID

1.1 Sisepõlemismootorid

Sisepõlemismootor on jõumasin, mis kasutab töötamiseks soojusenergiat. Tööprotsessis muudetakse gaasilise või vedela kütuse keemiline energia mehaaniliseks tööks. [11, lk169]

Sisepõlemismootoreid jagatakse tööpõhimõtte põhjal kolb- ja turbiinmootoriteks .

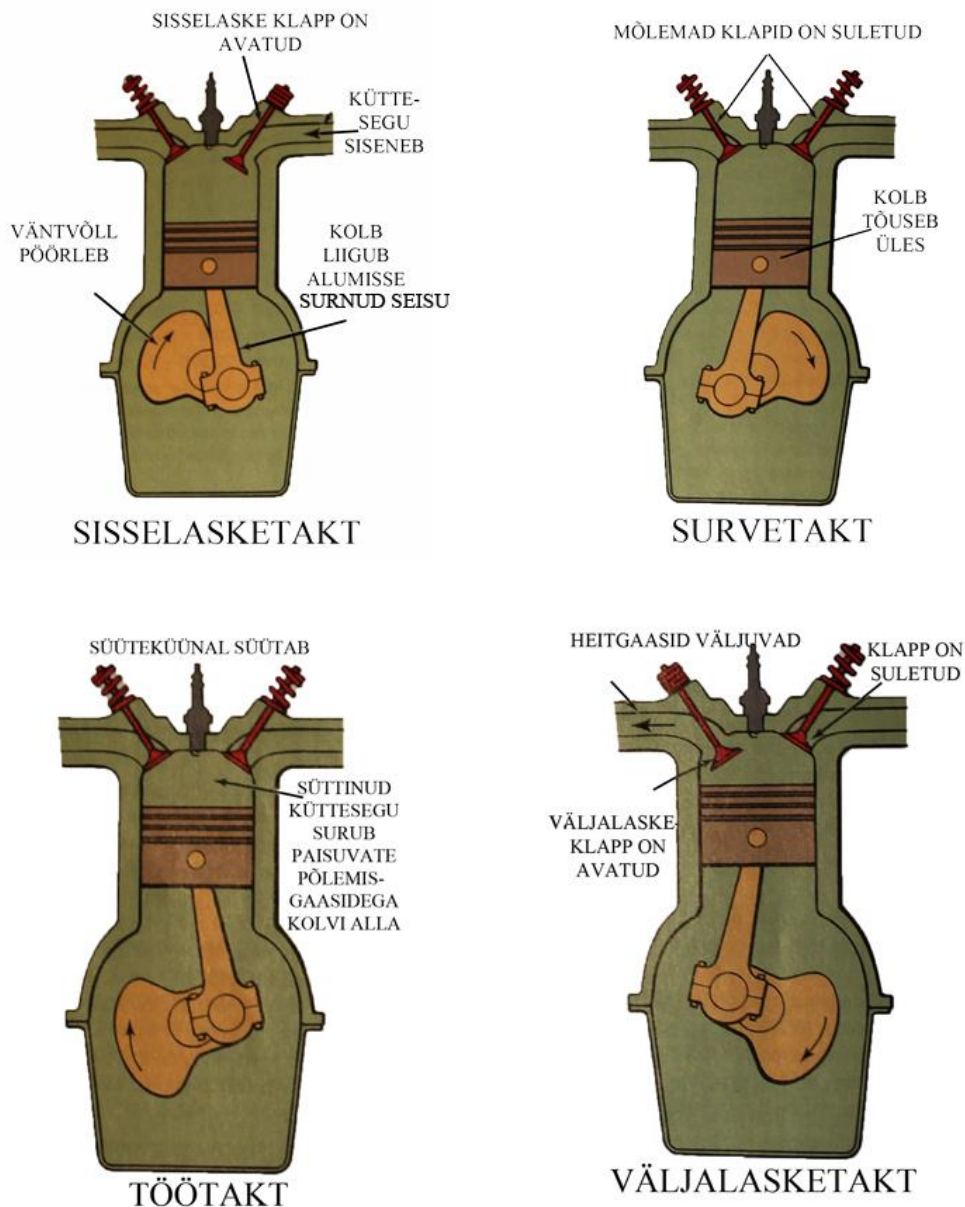
Turbiinmootori eripäraks on see, et veojõudu tekitatakse turbiinist väljavoolava gaasi või vedelikujoaga. Mootorit läbival völlil on kompressor, mis koosneb mitmetest järjestikku asetsevatest labadega turbiinidest, mis tõstavad mootoris voolaga õhu voolamise kiirust ning rõhku. Rõhu all õhk suunatakse põlemiskambris, kus pihustatakse õhku kütust ja küttesegu süüdatakse. Põlemise tulemusel suureneb gaaside rõhk veelgi, samuti ka nende kiirus ja nad suunatakse läbi järgmise turbiini labade, mis asetseb samal völlil, mis esimene turbiin. Kuumad gaasid kiirendavad mootori völli liikumist ning väljuvad tagant osast läbi aheneva düüsi, tekitades reaktiivjõudu, mis tõukab mootorit edasi. [7,18]

Kolbmootorid. Käesolevas töös käsitletakse kolbmootorite heitgaase. Kolbmootor koosneb põhiliselt mootoriplokist, mille peal asetseb plokikaas ning all karter. Mootoriploki keskmes asub vöntvölli, mis kannab põlemiskambris tehtud töö üle erinevatele reduktoritele, mis lõpuks viivad vöntvölli pöörlemise veoorganiteni. Vöntvölli kinnituvad kepsu ning neile omakorda kinnituvad kolvid. Kolvid asetsevad tihendatult silindrites ning sulgevad seeläbi silindrite alumise otsa. Kolb liigub vöntvölli pöörlemisel silindris edasi-tagasi. Mootoriploki peale kinnitub plokikaas, mis ühtlasi katab kinni ka silindrite ülemised otsad. Plokikaanes asuvad, olenevalt täpsemalt mootoritüübist, erinevad gaasijaotusmehhanismid. Toite- ning süütesüsteemid asetsevad samuti osaliselt plokikaanes. Nad võivad olla iseseisvad või osaliselt seotud Gaasijaotusmehhanismiga

Kolbmootorid on läbi aegade läbinud mitmeid erinevaid arengusuundasid, mis on mootori erinevaid ehituslikke osasid või nende tööpõhimõtteid muutnud või asendanud. Kuid valdavalt võib öelda, et ühiseks jooneks kõigi kolbmootorite puhul võib endiselt pidada kolvi edasi tagasi liikumise mõjul vöntvölli pöörlema panemist, mida saab rakendada töö tegemiseks. [7,8,9]

Kolbmootoreid on võimalik liigitada mitmel erineval viisil. käesoleva töö raames eristatakse neid nende teoreetilise ringprotsessi põhjal: Ottomootorite ja diiselmootoritena.

Ottomootor. Esimene neljatahtiline kolbmootor töötati välja 1876. Aastal saksa leiutaja Nikolaus August Otto poolt ning kannabki sellepärast Ottomootori nime. Ottomootori tööprotsess jaguneb neljaks taktiks, mis kestavad kõik pool vääntvõlli pööret, ehk 180° kraadi. Protsessi esimene takt algab, kui kolvi alla liikumisest tekkinud hõrenduse tõttu imetakse avatud sisselaskeklapi kaudu silindrisse küttesegu. (**Joonis 1 ülemine vasak**) Teine takt on survetakt, siis tõuseb kolb uuesti üles ning suletud klappide tõttu surutakse küttesegu kokku. (**Joonis 1 ülemine parem**) Töötakti alguseks on jõudnud kolb niinimetatud ülemisse surnud seisule, mis on kolvi liikumise ülemine lõppasend. (**Joonis 1 alumine vasak**) Töötakt algab küttesegu süütamisega, mille tulemusena paisuvad põlemisgaasid tõukavad kolvi uuesti alla. Ottomootorites kasutatakse elektrilist kaarleeki, ehk sädet, et süüdata kütuse ja õhu segu. Töötakti ajal teeb mootor kasulikku tööd - kolvi kiirendus kantakse üle vääntvõllile. Töötaktile järgneb väljalasketakt. (**Joonis 1 alumine parem**) Avaneb väljalaskeklapp ning kolvi ülesliikumise tõttu surutakse põlemiskambri rõhk välja tekkinud heitgaasid. Peale väljalaske takti sulgub väljalaskeklapp ning avaneva sisselaske klapi abil algab ringprotsess uuesti. Sisse- ja väljalaskeklappe juhitakse nukkvõlliga, mis on fikseeritud ülekandega ühendatud vääntvõlliga. Iga vääntvõlli täispöörde kohta, teeb nukkvõll pool pööret. Mida rohkem kolbe on ühel vääntvõllil, seda tihedamini toimuvad töötaktid ning seda ühtlasem on vääntvõlli pöörlemine. Sujuvama pöörlemise saavutamiseks kasutatakse kolbmootorite vääntvõllidel hooratast. [8,10, lk49-50]



Joonis 1. Neljataktilise kolbmootori neli töötakti. [10, lk 50]

Diiselmootor loodi 1892. aastal saksa inseneri Rudolf Dieseli poolt. Diiselmootor on ottomootoriga sarnaste taktidega neljataktiline kolbmootor. Erinevused seisnevad kütuse juhtimises silindrisse ning selle süütamises töötaktil. Kütuse pihustamiseks silindrisse on plokikaanes spetsiaalne kõrgrõhul (tänapäeval kuni 2000 bari) töötav kütusepihusti. Diiselmootori puhul imetakse mootorisse sisselaske taktil vaid puhast õhku, mis survetaktil kokku surutakse. Diiselmootori survetaktil tekitatakse silindrisse kõrgem rõhk kui ottomootori puhul, mille tõttu õhk silindris kuumeneb umbes 540°C juurde. Survetakti

lõpuks ülemises surnud seisus, või vahetult enne seda, pihustatakse kuumenenud õhku diislikütust. Kütuse ja õhu segunemisel tekib süttimisvõimeline küttesegu. Silindris valitseva kõrge temperatuuri ning rõhu tõttu süttib tekkinud küttesegu ning gaaside paisumise tõttu surutakse kolb alla - toimub töötakt. Sisse – ja väljalaske klappide töö toimub sarnaselt ottomootorile. [10, lk 60-61]

1.2 Sisepõlemismootorite heitgaasid

Sisepõlemismootorites, nagu ka nimi ütleb, toimub põlemine. Põletatakse peamiselt toornaftast toodetud süsivesinike segusid. Põletatud kütusest saadakse kasulikku tööd, mida saab rakendada näiteks autoga liiklemiseks. Põlemise käigus tekib aga ka palju erinevaid gaase, millest enamik on kahjulikud loodusele ning inimtervisele, seetõttu on viimastel aastakümnetel pandud rõhku sellele, et vähendada atmosfääri paisatavate gaaside hulka. Kuna sisepõlemismootorite kütused on peaaesjalikult süsivesinikud, siis tekib paratamatult kütuse põlemise järgselt mitmeid erinevaid süsinikuühendeid. [10 lk 311-315] Mootor tarbib töötamiseks õhuhapniku, millega ühes imetakse põlemiskambrisse kõiki teisi gaase, mis meid igapäevaselt ümbritsevad. Õhus on keskmiselt vaid 21% hapniku, mida on vaja põlemiseks, suurem osa meie atmosfäärist aga koosneb lämmastikust (Umbes 78%) [14] Põlemiskambris kõrgetel temperatuuridel ning rõhkudel laguneb lämmastik ja tekivad ohtlikud lämmastiku ühendeid, mille üldnimetuseks on NOx. Ideaaltingimustes toimuks täielik põlemine, mille käigus muudetakse mootorikütuse ja hapniku segu: soojusenergiaks, veeauruks ning süsihappegaasiks. Paraku on raske töötavas mootoris luua ideaalseid tingimusi põlemiseks ning teatud osa kütusest ei põle täielikult ära, niimoodi satuvad heitgaasidesse ka osaliselt põlemata süsivesinikud. Mittetäielik põlemine ongi peamiseks soovimatute heitgaaside, ehk emissioonide, tekkepõhjuseks. Kõik sisepõlemismootori heitgaasid, väljaarvatud veeaur ja üleliigne hapnik, on kas otseselt või kaudselt kahjulikud keskkonnale ja inimtervisele. [15 lk 825-826, 14]

Süsinikmonooksiid ehk vingugaas on värvusetu, maitsetu ja lõhnatu mürgine gaas, mis tekib valdavalt mittetäieliku või vähese hapnikuga põlemise käigus. Mootoris võib CO tekkida ka liiga rikka segu puhul. Vingugaas on väga ohtlik, sest segab inimeste ja muude imetajate veres hapniku sidumist ja seeläbi võib põhjustada peavalu, uimasust või

suuremates kogustes koguni surma. Seetõttu on süsinikmonooksiid üks neist gaasidest, mille kogust sisepõlemismootorite heitgaasides mõõdetakse ning millele on esitatud piirmäärad, kaitsmaks keskkonda ning elusolendeid, sealhulgas inimesi. [17, 15 lk 826]

Lämmastikoksiidid tekivad põlemise kõrvalproduktina, kui hapnik ja lämmastik omavahel reageerivad. Lämmastiku okside on mitmeid, Näiteks: lämmastikmonooksiid (NO), lämmastikdioksiid (NO₂), dilämmastikoksiid (N₂O) jne. Peamiselt esineb lämmastikmonooksiidi ja dioksiidi. Lämmastikuoksiide tekib põlemiskambris valitseva kõrge temperatuuri ning rõhu tõttu, mis lagundab õhus leiduva lämmastiku. Vabad lämmastiku aatomid ühinevad aga kohe küttesegus leiduvate hapnikuaatomitega, luues erinevaid okside. [15 lk 827]

Süsivesinikemissioonid tekivad peaaesjalikult põlemata mootorikütusest või põlemiskambris sattunud määrdeainetest. Kuid süsivesinike sattumisel heitgaasidesse on veel mitmeid erinevaid põhjuseid, näiteks siis kui süüdatud küttesegu põrkub vastu külma silindriseina ning kiire allajahtumise käigus katkeb põlemise jaoks vajalik ahelreaktsioon. Ka süsivesinike puhul võib öelda, et nende emissioonide üheks põhjustajaks on ebatäiuslikud tingimused põlemiskambris. [15 lk 827]

Tahkete osakeste all peetakse enamasti silmas tahma, mis tekib ebatäieliku põlemise tulemusena. Tahmaga koos võib heitgaasidega väljuda veel erinevaid süsivesinike, mis on tahmaosakeste külge kinnitunud. Kõige enam eritab tahkeid osakesi diiselmootor, seda just õhupuuduse käes töötades, see juhtub näiteks suure koormuse või äkilise kiirenduse ajal. Ka ottomootoritel tekib mõningal määral tahkeid osakesi, seda samuti mittetäieliku põlemisprotsessi tõttu. Üheks põhjuseks on veel mootorites kasutatavad määrdeained, mis ei põle niivõrd kiiresti kui mootorikütused ning väljuvad väljalaskesüsteemist tahkete osakestena. [15 lk 829, 14]

Nüüdisajaks on võimalik väga täpselt mõõta kõiki sisepõlemismootorite poolt väljapaisatavaid heitgaase. Samuti on teada nende kahjulik mõju inimestele, loomadele ning ülejäänud loodusele. Seetõttu on läbi aegade püütud leida viise, et vähendada sisepõlemismootorite emissioone. Laialdaselt kasutatakse tänapäeval kahte põhitüüpi kolbmootoreid ja mootorikütuseid: Mootoribensiini sädesüütel töötavas ottomootoris ning diislikütust survesüütel töötavas diiselmootoris. Nende mootorite ehitusest, kütusest ja selle süütamise eripäradest tulenevalt on kasutusele võetud nii sarnaseid kui ka erinevaid

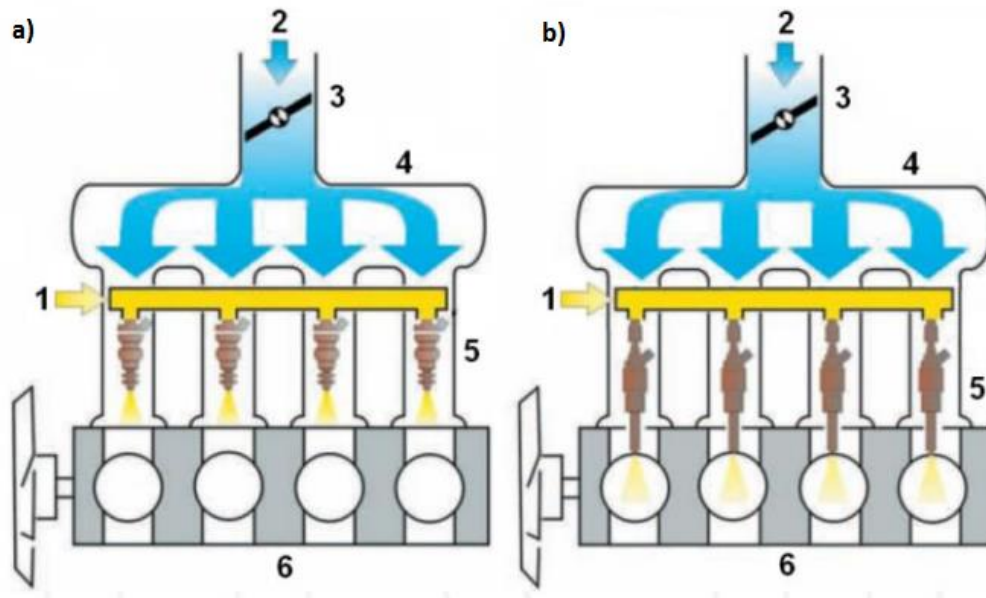
meetmeid vähendamaks kütusekulu, heitgaase ja neis olevaid ohtlike emissioonide kogust. [15 lk 825-830]

Segumoodustamine ottomootorites. Üks esimesi viise, kuidas vähendada heitgaase, on parandada küttesegu. Kuna õhu ja kütuse suhe peab olema võimalikult täpne, siis näiteks muutes küttesegu kergelt lahjemaks (lisades rohkem õhku) on võimalik vähendada CO ja süsivesinike emissioone. Samas võib lahjem küttesegu esile kutsuda kõrge lämmastikuoksiidide tekke. Parimaid tulemusi saab, kui juhtida kõigi silindrite kütuse ja õhu suhet nii, et nad oleksid kõigis silindrites võimalikult võrdsed. Võimalikult hea põlemisprotsessi jaoks mootoris, on vajalik hea kütuse ettevalmistus, selle jaoks on läbi ottomootorite ajaloo olnud mitmeid erinevaid lahendusi. Karburaatorid on tänaseks jäänud tahaplaanile või kasutatakse neid vaid kindlates valdkondades ja teatud tüüpi mootorite puhul. Kaasajal kasutatakse valdavalt erinevaid sissepritsesüsteeme, millest kahte on kujutatud **joonisel 2**. [15 lk 830]

Kaudne hargpritse. Hea Küttesegu valmistamise saab näiteks kaudse hargpritsiga (joonisel 2 a), kus kütus (1) pritsitakse sisselaske klapi ette ning seejärel imetakse klapi avamisel koos õhuga (2) mootorisse (6). Selline süsteem võimaldab väga täpselt ajastada ja mõõta igasse silindrisse suunatavat kütust. Kütust pritsitakse sisselaske klapi ette vahetult enne klapi avanemist või klapi avanemise ajal. Kuna pritseag on pikem kui otsesel hargpritsel (joonisel 2 b), siis Moodustub üldiselt üsnagi optimaalne ning kohati homogeenne segu. Täpselt mõõdetud kütuse kogused iga silindri kohta parandab põlemisprotsessi juhtimist ning aitab veelgi vähendada kütusekulu ja seeläbi heitgaase. [13 lk 14, 15 lk 560;830]

Otsesissepritse. võimaldab veelgi täpsemalt määrata kütuse koguseid, muutes mootori ökonoomsemaks. Puudusteks on suhteliselt lühike pritse aeg, mis takistab optimaalse kütuse ja õhu segu teket. Kütus pritsitakse juba survetaktis olevasse silindrisse, mis tähendab, et silindris leidub kohti, kus on ainult kütuseosakesed ja kohti, kus on vaid õhku. [15 lk 560,570,830] Selle vältimiseks tekitatakse näiteks silindrisse sisseimetava õhuvoolu, sissepritsitava kütusepilve või põlemiskambri ehituslikkude eripäradega keeriseid. Keeristega proovitakse esialgu saavutada süüteküünla vahetus läheduses süütamiseks optimaalne küttesegu ($\lambda \approx 1$ ehk kütust ja õhku on võrdselt). Segu edasine põlemine toimub ahelreaktsioonidena süüteküünlast eemale liikuva leegifrondi toimel. Otsesissepritsiga ottomootorite puhul suudetakse, tänu suhteliselt lahjale segule mujal silindris, saavutada

väiksemaid kütusekulusid, võrreldes teiste ottomootorite toitesüsteemidega [15 lk 571]
Vähendatud kütusehulk tähendab ühtlasi vähendatud hulka tekkivaid heitgaase.



Joonis 2. Ottomootorite a- kaudne hargpritse, b- otsene hargpritse, 1-kütus, 2- õhk, 3- drosselklapp, 4- sisselaskekollektor, 5- pihustid, 6- mootori põlemiskambriid [16]

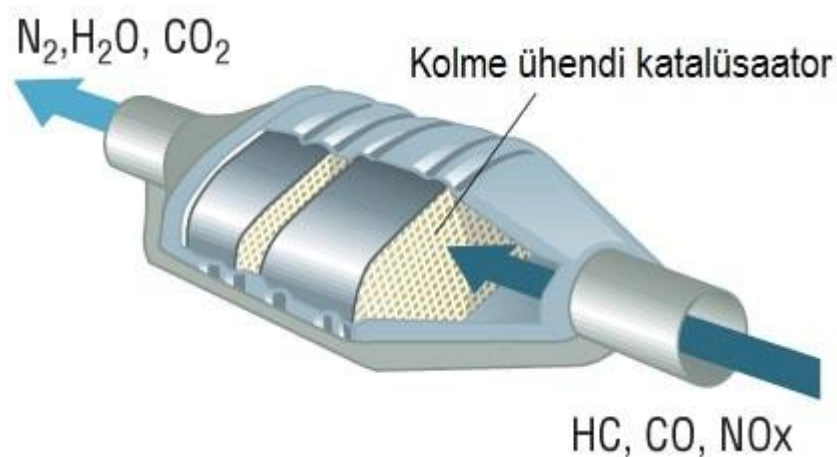
Segumoodustamine diiselmootorites. Diislite puhul kasutatakse segumoodustamiseks peaaegu ainult otsesissepritset. Õhukogust klassikalises diislis ei piirata, sisselasketakti ajal imetakse silindrisse puhast õhku, mis seejärel survetakti ajal rõhu alla surutakse. Kolvi survetakti ülemises surnud seisus pritsitakse, rõhu alla surutud ja selle toimele kuumenenud, õhku kütust, mis õhuga seguneb, küttesegu süttib põlemiskambri kõrge temperatuuri tõttu ilma muu välise süüteallikata ning algab ahelreaktsioonina diislikütuse põlemine. Põlemisprotsess peab olema võimalikult kiire ja hõlmama kogu põlemiskambrit, seejuures ei tohi aga põlemistemperatuurid kerkida liiga kõrgele. Selliste tingimuste täitmisel on põlemine suhteliselt saasteainete vaene. Põlemisvõimelise küttesegu süttimine ei alga ühest punktist, nagu see juhtub sädesüütega mootorite puhul, vaid tekivad mitmed süttimispunktid. Neist punktidest väljuv leek levib mööda põlemiskambrit ning süütab edasist küttesegu. Küttesegu moodustamine, süttimine ja põlemisprotsessid toimuvad põlemiskambri samaaegselt, millest tulenevalt võiks öelda, et sissepritse hetkest alates toimuvad edasi juhuslikud ahelreaktsioonidena levivad plahvatused. [15 lk 578]

Silindris parema küttesegu moodustamiseks, kasutatakse diislites mitmeid tehnilisi lahendusi. Kasutusel on näiteks lameda ja võimalikult laia põhjaga põlemiskambrid ning mitme avaga pihustid, mis soodustavad takistamatut kütusepiiskade levikut põlemiskambris ja parandavad ühtlast kambri täitumist kütteseguga. [15 lk 832] Sissepritse rõhud on kaasajal jõudnud juba üle 2000 bari. Kõrgete rõhkudega soovitakse saavutada kiiremini veelgi peenemaid kütusepiiskasid, et seeläbi katta kiiremini ära suurem põlemiskambris ruumala, luues ühtlasema küttesegu. Osaliselt on üha tõusvad sissepritserõhud seotud ka kiirekäigulisemate diislite turuletulekuga, nende laialdasema kasutuselevõtiga sõiduautode jõuallikana. Kõrgem rõhk aitab kaasa õhuliikumise elavdamisele, mis vähendab liigrikka segu teket, mis on üks heitgaasides leiduvate tahkete osakeste tekitajaks diislites. [15 lk 579] Turbokompressori laialdane kasutusele võtta diiselmootorites on hüppeliselt suurendanud nende kasutegurit ning ühtlasi vähendanud erinevate emissioonide koguseid heitgaasides. Õhulaengu vahejahutite kasutamine tõstab kasutegurit veelgi enam. Tänapäeval on võimalik üleslaadimist mitmetes koormusolukordades juhtida, mis on eelkõige vähendanud lämmastikoksiidide emissioone. Uudseteks lahendusteks on näiteks elektriline üleslaadimine, mis vähendab oluliselt tahkete osakeste ja tahma teket olukordades, kus mootoripöörded on veel liiga madalad heitgaaside turbokompressori tööle rakendumiseks, seda näiteks tühikäigult kiirendamine. [15 lk 832]

Heitgaaside tagastussüsteem. Nii otto- kui diiselmootorite puhul kasutatakse heitgaaside tagastust põlemiskambrisse. Peamiselt on heitgaaside silindrisse tagasisuunamise eesmärgiks lämmastikuoksiidide vähendamine heitgaasides. Lisatud heitgaasid on põlemisprotsessis inertsed ning alandavad põlemistemperatuuri haripunkte, see omakorda vähendab NO-ühendite teket. Diiselmootorite puhul kasutatakse tagastuses valdavalt suuremaid heitgaasi koguseid kui ottomootorite puhul. Täpsemalt doseeritud ning eelnevalt jahutatud heitgaasid annavad kõige paremaid tulemusi, kuid tagastatud heitgaasid vähendavad põlemise temperatuuri, mille tõttu võib tekkida heitgaasidesse rohkem tahkeid osakesi, süsinikmonoksiidi ja põlemata süsivesinikke. [15 lk 799,832,833]

heitgaasi katalüsaator. Tänapäeval on iga sõiduki väljalaskesüsteemi lahutamatuks osaks katalüsaator, mis muundab emissioonide kahjulikud gaasid ohutumateks ühenditeks. Peamised soovimatud heitgaasi komponendid, mis sisepõlemismootorist väljuvad, on süsinikuühendid ja lämmastikoksiidid. Süsinikuühendite hulka kuuluvad puhta põlemisega kaasnev süsinikdioksiid ja kahjulik süsinikmonooksiid ning põlemata süsivesinikud.

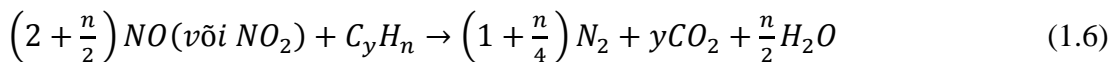
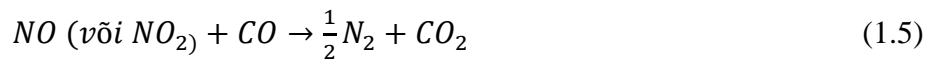
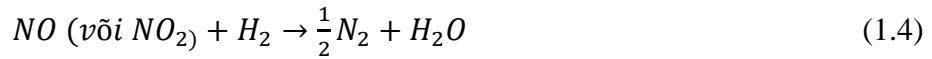
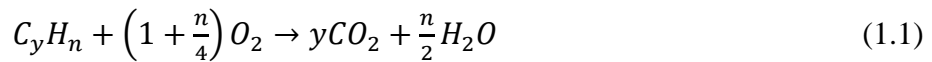
Katalüsaator koosneb terasplekist ümbrisest, mille sees on keraamikast või metallist sõrestik, mille eesmärk on tekitada võimalikult suur pind mille peal keemilised reaktsioonid saaksid toimuda. Sõrestik on kaetud erinevate väärismetallidega, nagu näiteks plaatina, roodium ja palladium, mis muundereaktsioonide katalüsaatoriteks. Katalüsaatoreid on nii universaalseid kui ka spetsiifiliselt kas otto- või diiselmootoritele. Ottomootorite puhul kasutatakse valdavalt kolme ühendi katalüsaatorit (**Joonis 3**), milles on nii oksüdeerumist kiirendav kui ka reduktsiooni kiirendav osa. Katalüsaator paigutatakse valdavalt võimalikult väljalaskekollektori lähedale, sest katalüsaatori vajab tööks temperatuuri, mis on ligilähedane mootorist väljuvate heitgaaside temperatuurile. [15 lk 835-836]



Joonis 3. Kolme ühendi katalüsaator, mis oksüdeerib CO ja HC ning redutseerib NO_x ühendid kõik ühes korpuses. [12]

Diislite puhul on kasutusel ainult oksüdatsiooni hõlbustavad katalüsaatorid, mis muudavad süsinikmonooksiidi ja põlemata süsivesinikud süsihappegaasiks ja veeauruks. Lämmastikuühendeid vähendatakse valdavalt juba mootoris, näiteks heitgaaside taasinglusega. [15 lk 859]

Valemid 1.1-1.3 kirjeldavad süsinikmonooksiidi ja süsivesinike oksüdeerimist süsinikdioksiidiks ja veeauruks. **Valemid 1.4-1.6** kirjeldavad lämmastikoksiidide reduktsiooni lämmastikuks. [15 lk 835,836]



Kus	C	- süsinikuaatom,
	H	- vesinikuaatom,
	O	- hapnikuaatom,
	N	- Lämmastikuaatom,
	y	- süsinikuaatomite kordaja,
	n	- vesinikuaatomite kordaja,

1.3 Tahma ja tahkete osakeste arvu mõõtmine heitgaasides

Tahm on tahked grafiitse süsiniku osakesed suurusvahemikus 0,1 kuni 50 m⁻⁶ (mikronit), mis tekib valdavalt mittetäieliku põlemise tulemusena. Tahma koostises leidub ka hulganisti põlemisjääke erinevate aromaatsete süsivesinike näol, mis on kantserogeense mõjuga. Valdavalt keskendutakse mõõtmiste puhul diiselmootorite heitgaaside tahmasusele, sest seda tüüpi sisepõlemismootoritel on kalduvus kõrgemale tahma sisaldusele heitgaasides. [4,10 lk 71]

Gravimeetriline analüüs. Tahmasisalduse mõõtmiseks on üks meetodeid gravimeetriline analüüs, mis seisneb heitgaaside läbi filterelemendi juhtimisel ning Hiljem filterelemendile sadestunud osakeste massi väljaselgitamisel. Valdavalt kasutatakse diiselmootorite tahmaosakeste massi mõõtmisel kindla ruumala ja temperatuuriga lahjendatud heitgaase. Gravimeetrilise analüüsi eeliseks on see, et sadestunud tahmaproovi saab hilisemal ka

muudeks analüüsideks kasutada. Näiteks saab kindlast määrata filtrile sadestunud proovi koostise. Puudused seisnevad asjaolus, et lahjendatud heitgaasidega liigub läbi filtri ka muid tahkeid ja vedelaid osakesi peale tahma, mis massimõõtmisel loetakse tahmamassi osaks. [3]

Heitgaaside suitsusust hinnatakse optiliselt, võrreldes suitsu läbipaistmatust puhta õhu suhtes. Suitsuse mõõtmiseks kasutatavad seadmed on lihtsama ehitusega ja odavamad, seetõttu kasutataksegi neid näiteks tehnöölevaatuse ajal sõiduki tehnilise seisukorra hindamisel ja mõõtmistel väljapool laboratooriume. Suitsususe mõõtmisel on samas mitmeid puudusid. Seadmed reageerivad ka näiteks NO_x ühenditele, sest ka nendesse neeldub osa valgusest, mida loetakse tahkete osakeste hulka. Teisest küljest on puuduseks sõltuvus osakeste suurusest. Liiga väikeseid osakesi ei loendata suurematega samavääriselt, mis muudab mõõtmiste lõppväärtust väiksemaks. [19]

2. AIRMODUS A20 OSAKESTE LOENDUR

2.1 Seadme kirjeldus

Meid ümbritsevas õhus leidub suurel hulgal aerosoolseid osakesi, mida pole seni olnud võimalik otseselt mõõta, kuid nad avaldavad mõju õhukvaliteedile ning samuti ka inimestele. Airmodus kasvatab need osakesed optiliselt suuremaks, kondenseerides neile vedelikku. [1 lk 8]

Airmodus A20 osakestelendur on kujutatud **Joonisel 4**. Seadme korpus on valmistatud lehtmestallist ning on suhteliselt minimalistliku kujundusega. Esiküljel asetseb puutetundlik ekraan, (1) mille kaudu on võimalik kasutajal näha graafiliselt mõõtmistulemusi ning jälgida seadme tööparameetreid. Seadme esipaneelil on lisaks veel avad butanooli pealevooluks (2) ja üleliigne butanooli väljutamiseks (3). Avad on varustatud kiirliiteühendustega, mis hõlbustab sinna voolikutega vastavate anumate ühendamist. Ekraani all on kolm indikaatorlampi, mis annavad kasutajale märku, et:

4. Seade on sisse lülitatud, Sisselülitatud seadme puhul põleb indikaatorina roheline tuli.

5. Seadme tööparameetrid on normi piires (roheline tuli) või on mõni väärtus väljaspool nõutud piire (punane tuli)
6. Mõõdetavas õhus on loendatavaid osakesi. Kollane tuli vilgub väheste osakeste puhul ning süttib püsivat rohkemate osakeste puhul.

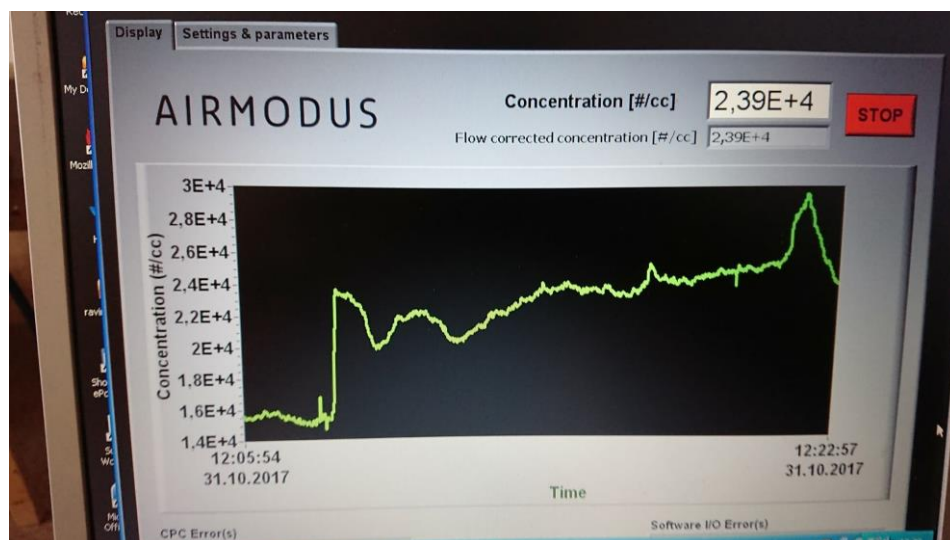


Joonis 4. Airmodus A20 isomeetriline vaade eestpoolt 1- Puutetundlik ekraan, 2- butanooli pealevoolu ava, 3- butanooli väljaviigu ava, 4- toiteindikaator, 5- olekuindikaator, 6- osakesteloenduri indikaator. [1, lk11]



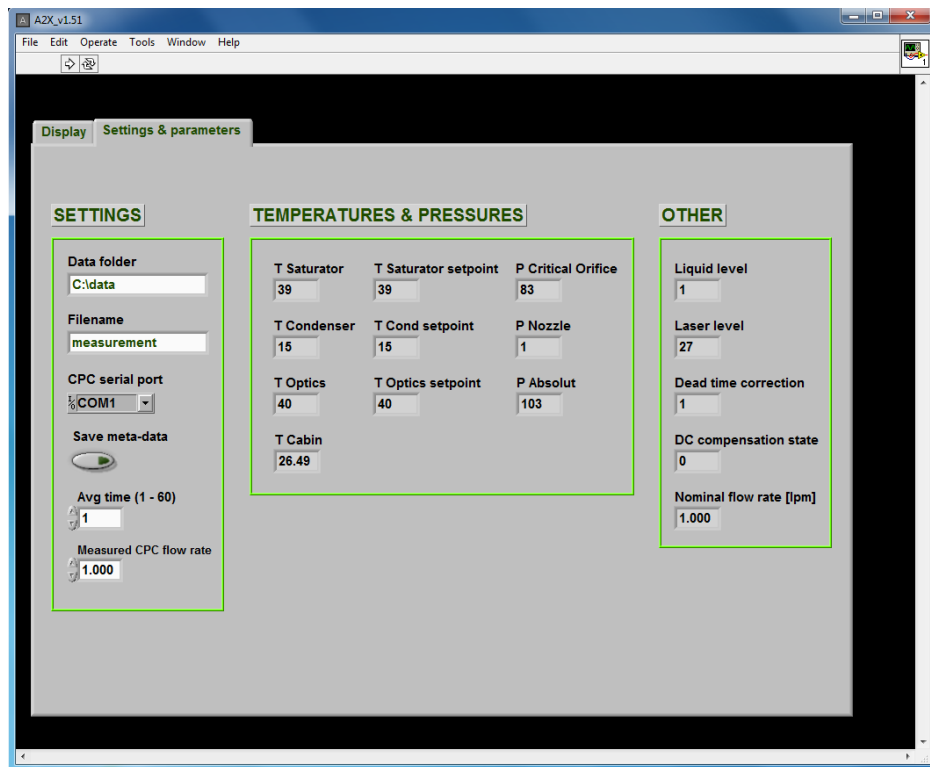
Joonis 5. Airmodus A20 tagantvaade. [airmodus 12] 1- mõõdetava õhu sisendava, 2- toitelüliti, 3- toitekaabli pistik, 4- sulavkaitse, 5- välise vaakumpumba ühendusava, 6,7,8,9- erinevad pistikud teiste seadmetega ühendamiseks. [1 lk 12]

Seadme tagumisel küljel (**joonis 5**) on erinevad ühenduspesad: masina vooluvõrku ühendamiseks, õhu- ja vaakumivoolikute tarbeks ning väliste seadmetega ühendamiseks. Käesoleva töö raames ühendati Airmodus ka personaalarvutiga, kuhu talletati katsetulemused edasiseks analüüsiks. Selleks kasutati seadmega kaasa tulnud spetsiaalset tarkvara, mis lisaks mõõtmistulemuste kuvamisele (**Joonis 6**) ja talletamisele, võimaldas loenduri tööparameetreid kaugjuhtida (**Joonis 7**).



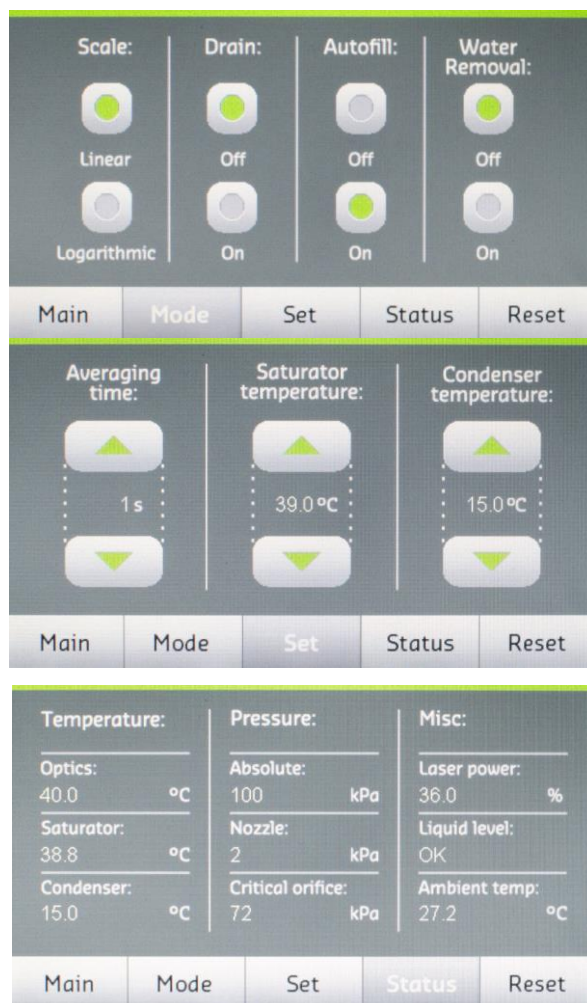
Joonis 6. Airmodus arvutitarkvara mõõtmistulemuste graafiline kujutamine.

Vertikaalteljel- osakeste hulk kuupsentimeetri õhu kohta, horisontaal teljel mõõtmiste ajatelg. (Pilt heitgaaside mõõtmisest eelkatsetuste ajal)



Joonis 7. Airmodus arvutitarkvara sätete ja parameetrite kuva. [1 lk 19]

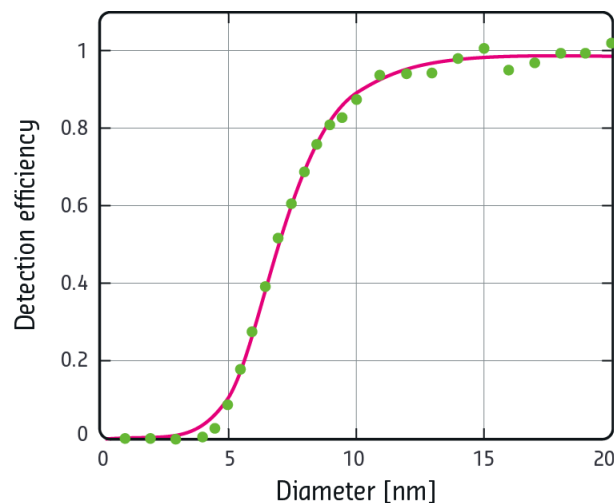
Puutetundliku ekraani kaudu on võimalik kasutajal anda seadmele käsklusi näiteks butanooli koguse muutmiseks süsteemis (**joonis 8 üleval**) või muuta mõõtmistulemusi mõjutavaid parameetreid: mõõtmiste ajaline intervall, butanooli küllastus- ja kondenseerumistemperatuur (**joonis 8 keskel**). Kolmas kuva annab ülevaate olulisematest seadme parameetritest, nagu näiteks: Õhurõhk, temperatuur seadme sees, butanooli tase seadmes jne. (**joonis 8 all**)



Joonis 8 Airmodus A20 puutetundliku ekraani menüü kuva **üleväl**- butanooliga seotud režiimide vahetus, **Keskel**- mõõtmiste ajalise intervalli ja butanooli küllastus- ja kondenseerumistemperatuuri määramine, **all**- seadme ja katsekeskkonna olulisemad parameetrid. [1 lk 23-25]

2.2 Tööpõhimõte

A20 kondensatsioonil põhinev osakeste loendur (*inglise keeles Condensation Particle Counter*) on mõeldud loendama õhus leiduvaid tahkeid ja vedelaid osakesi suurusjärgus 7 m^{-9} kuni 2.5 m^{-6} . **Joonise 9** kujutatud graafikul on väljatoodud Airmodus A20 kasutegur mõõtmistel vahemikus 0 kuni 20 m^{-9} . Kasuteguri väärtused on nullist, see tähendab, et ei loendata peaaegu üldse osakesi kuni üheni, mil loendatakse peaaegu kõik mõõdetavas gaasi leiduvad osakesed. [1 lk 8]



Joonis 9. Airmodus A20 kasutegur nullist üheni (vertikaalteljel) loendatavate osakeste erinevate läbimõõtude puhul nanomeetrites (horisontaalteljel) [1 lk 9]

Töövedelikuna kasutatakse airmodus A20-s butanooli. Seadmesse sisenevat, soovitatavalt toatemperatuuril, õhku rikastatakse butanooliauruga ning jahutatakse seejärel kuni butanooliosakesed kondenseeruvad õhus olevate osakeste peal. Airmoduse optikaseade tuvastab tekkinud piisakesed individuaalselt, vastavalt nende poolt hajutatud valgusele. Osakesi loendatakse ükshaaval kuni 30 000 osakeseni ühe kuupsentimeetri kohta. Kontsentratsioonidelt kuni 10^5 osakest ühes kuupsentimeetris, kasutatakse sisseehitatud korrektuurfunktsiooni. Loenduri mõõtmisviga on kuni 10^{-4} osakest kuupsentimeetri kohta. Suuremate osakeste kontsentratsiooni puhul on vajalik mõõdetava õhu lahjendamine. **Valem 2.1** kirjeldab, kuidas loendur jõuab mõõtmistulemuseni. [1 lk 8]

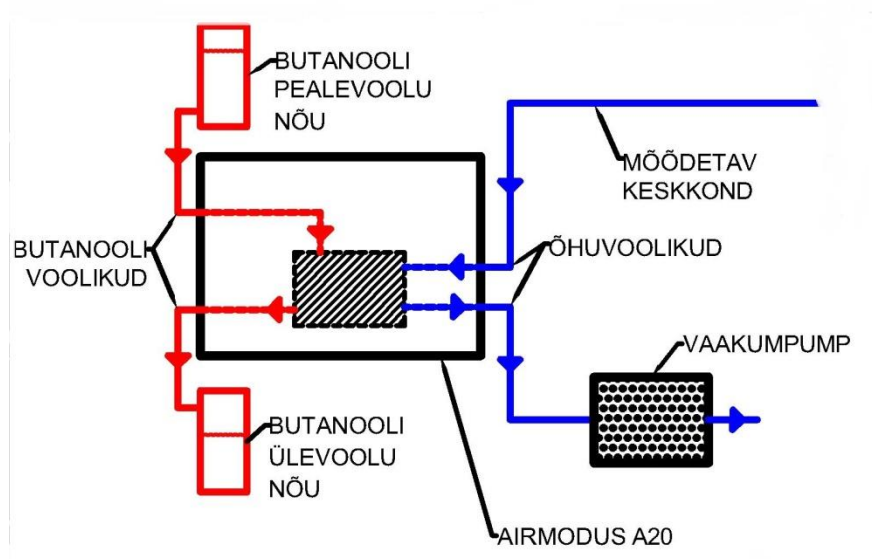
$$C = \frac{N}{Q \cdot t} \quad (2.1)$$

Kus C – osakeste arv ühest kuupsentimeetris osake*cm⁻³,
 Q – masinat läbiva õhu vooluhulk cm³*s⁻¹,
 t – mõõtmisele kulunud aeg sekundites s.

Valemis selgub, et loendamisel on oluline nii aeg kui ka vooluhulk. Õhuvool tekitatakse eraldiseisva vaakumpumbaga. Airmodus A20 vajab töötamiseks alarõhku vahemikus 75 kuni 105 kPa. Valmistaja juhendi järgselt peaks väliselt genereeritud alarõhk normaaltemperatuuri (15°C) ja rõhu (101.325 kPa) korral olema vahemikus 10 kuni 40 kPa. Nominaalne vooluhulk läbi loenduri on valmistaja poolt üks liiter minutis (l*min⁻¹), mis on 1.67*10⁻⁵ m³*s⁻¹ SI-ühikutes. Vooluhulka loenduris kontrollib airmodus avavusega sisendipoolsel küljel, millest läbides langeb õhurõhk. [1 lk 9]

2.3 Mõõtmiste läbiviimine seadmega Airmodus A20

Enne mõõtma asumist, on vaja seadmega ühendada butanoolianum ja tagada üleliigse butanooli äravool vastavasse paaki. Seadmega tuleb ühendada väline vaakumpump või mõni muu alarõhu allikas ning sisendava viia vooliku abiga keskkonda, mida soovitakse mõõta. Kui seade on ühendatud vooluvõrku ja lülitist (**joonis 5**) sisse lülitaud, algab ülessoojenemise protsess. Umbkaudu 10 minutit kulub seadmel, et end töövalmis seada. Juhul kui seade on olnud pikalt kasutuseta või tegemist on esmakäivitusega, kulub seadmel osakestelugeja piisaval määral butanooliga täitmiseks ja parameetrite kalibreerimiseks kuni 1 tund. Kui seadme kõik parameetrid on saavutanud kasutaja poolt määratud väärtused, süttib roheline oleku indikaatorlamp (**joonis 4**) ja seade alustab osakeste loendamist. Tulemusi saab kasutaja jälgida vahetult seadme ekraanilt või ühendada Airmodus A20-ga arvuti, et soovitud mõõtmistulemused talletada. **Joonisel 10** on kujutatud Airmodus A20 butanooli ja mõõdetava õhu liikumise põhimõtteskeem. Butanool voolab ülevalt osakesteloendurisse, kus vedeliku aurud segatakse mõõdetava õhuga. Üleliigne butanool suunatakse loendurist välja kogumis anumasse. Õhk liigub läbi loenduri vaakumpumba tekitatud hõrenduse tõttu. [1]

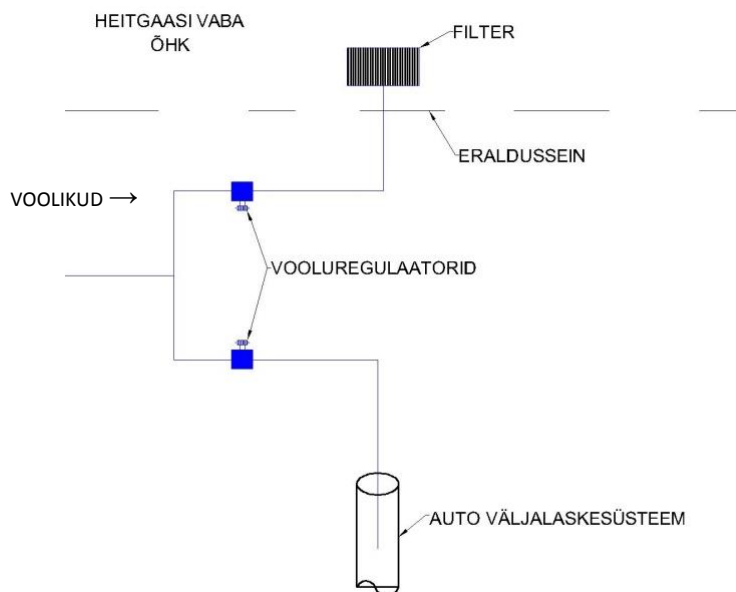


Joonis 10. Airmodus A20 butanooli- ja õhuvoolu põhimõtte skeem

2.4 Seadme kohandamine tahmaosakeste arvu mõõtmiseks

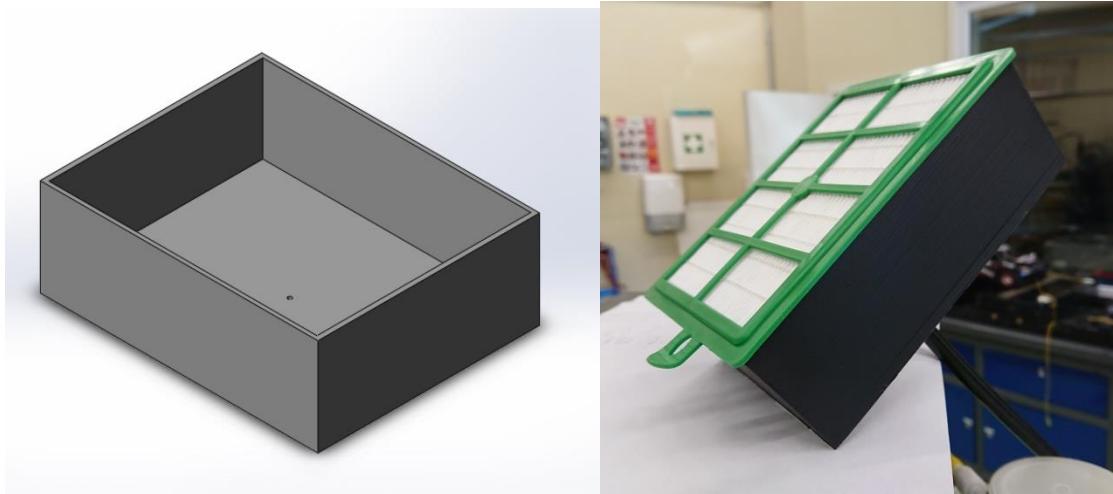
Töö autori eesmärgiks oli mõõta erinevate otto- ja diiselmootorite heitgaasides leiduvate osade hulka. Katsetused toimusid Eesti maaülikooli tehnikainstituudi mootorilaboris. Mõõtmised toimusid sisepõlemismootoritel nii tühikäigul kui ka kõrgendatud mootoripööretel ning võimalusel ka koormatud olukorras. Eesmärgi saavutamiseks tuli esmalt erinevate eelkatsetuste läbi kindlaks teha antud seadme sobivus ülesande täitmiseks. Ülesande sobivuse tõestamiseks prooviti mõõta erinevate sisepõlemismootorite heitgaase, proovides leida sobivaid lahendusi võrreldavate mõõtmistulemuste saamiseks. Katsetustes selgus õigepea, et katseseade on liiga tundlik lahjendamata heitgaaside suhtes ning välja tuleb töötada vastav katsetehnoloogia, mis võimaldaks heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu airmodus A20'ga mõõta. Peale mitmeid katseid arenes välja esmane tehnoloogia, mis suutis anda korratavaid katsetulemusi samadel tingimustel. Tehniline lahendus seisnes selles, et katseseadme mõõtmisisendi ette konstrueeriti **Joonisel 11** skemaatiliselt kujutatud gaaside voolu reguleeriv süsteem. Osakesteloendurisse jõudvat õhu ja heitgaaside segu on võimalik regulaarida mõlemasse äärmusesse ehk täielikult

avatud heitgaaside regulaator täielikult suletud õhu regulaatori korral, vastupidi ning kõik võimalikud vahepealsed suhted.



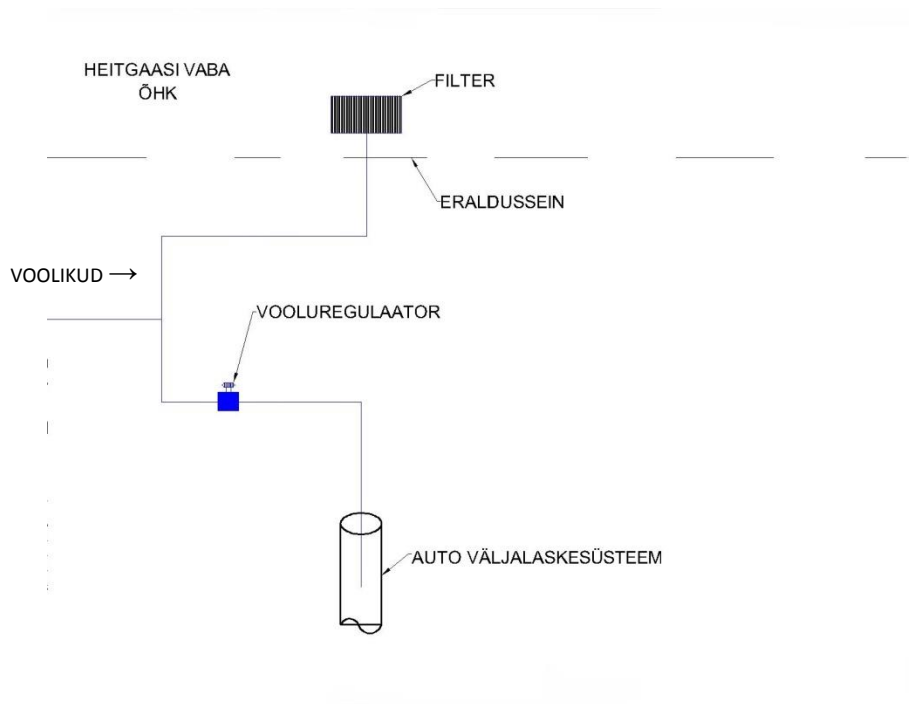
Joonis 11. Heitgaaside lahjendamise tehnilise lahenduse prototüüp.

Puhta õhu ja heitgaaside vooluhulkade reguleerimiseks loodud regulaatorite süsteemi esmastel katsetustel selgus, et osakesteloendur suudab tuvastada ka ruumis hõljuvat heitgaasi, tolmu ning muid osakesi. Näiteks tõusis õhus loendatud osakeste hulk märgatavalt kui samas ruumis tegid teised tudengid katseid mootorikütustega, mille aurud arvatavasti osakesteloenduri poolt tuvastati. Saamaks stabiilseid katsetulemusi, olenemata ümbritseva õhu puhtusest, projekteeriti õhu puhastamiseks filterlahendus. Korpus raalprojekteeriti solidworks tarkvaraga, mis võimaldas hiljem detaili 3D-printiteris välja printida. (**Joonis 12 vasakul**), millele kinnitati HEPA filterelement (**Joonis 12 paremal**). Filterelement ühendati voolikutega katseseadme külge ja viidi katsekohast võimalikult kaugele, võimalusel sulgeti ruumide vahel uksed. Enne mootorikatseid hoiti filtrit valitud keskkonnas piisav hulk aega, et oleks võimalik kindlaks määrata katse lähtetingimuste tarbeks katsete eelne loendatud osakeste arv.



Joonis 12. Projekteeritud filtrikorpuse isomeetiline joonis ja valmis detail koos filtriga

Sobiv lahendusaste leiti osaliselt katse-eksitus meetodil. Esmalt seati regulaatorid mitmete katsete tulemusena asendisse, mille puhul oli võimalik osakesi loendada, ilma, et väljutaks katseseade mõõtmispiirkonnast. Seejärel kontrolliti, et mõõtmistelt saadavad tulemused on samadel tingimustel püsivad ning katsed korratavad. Katseseadme tootja poolt on tehniliste lahendustega tagatud stabiilne vooluhulk läbi mõõtmisaparatuuri. Sellest tulenevalt oli võimalik välja arvutada erinevate regulaatori seadistuste puhul tekkinud heitgaasi ning õhu segu vooluhulkade erinevus. **Joonisel 13** on kujutatud skemaatiliselt lõplik lahendus, kus reguleeritav on vaid heitgaaside hulk mõõdetavas puhtas õhus. Täielikult avatud regulaatori korral on katseseadmesse jõudev gaaside segu kaheksa osa puhast õhku ning üks osa heitgaase. Heitgaaside hulka on võimalik regulaatoriga sujuvalt vähendada kuni täielikult suletud heitgaasivooluni.



Joonis 13. Skeem heitgaaside ja õhu hulga reguleerimissüsteemist.

Vooluhulk läbi regulaatori tehti kindlaks katseliselt, kasutades vooluhulga mõõteseadet PF7000, mis on ettenähtud vooluhulkade mõõtmiseks $Q_{min} = 5dm^3/h$ kuni $Q_{max} = 750dm^3/h$. Mõõtmistulemuste põhjal koostati tabel 3, mis on käesoleva töö **lisas 3**.

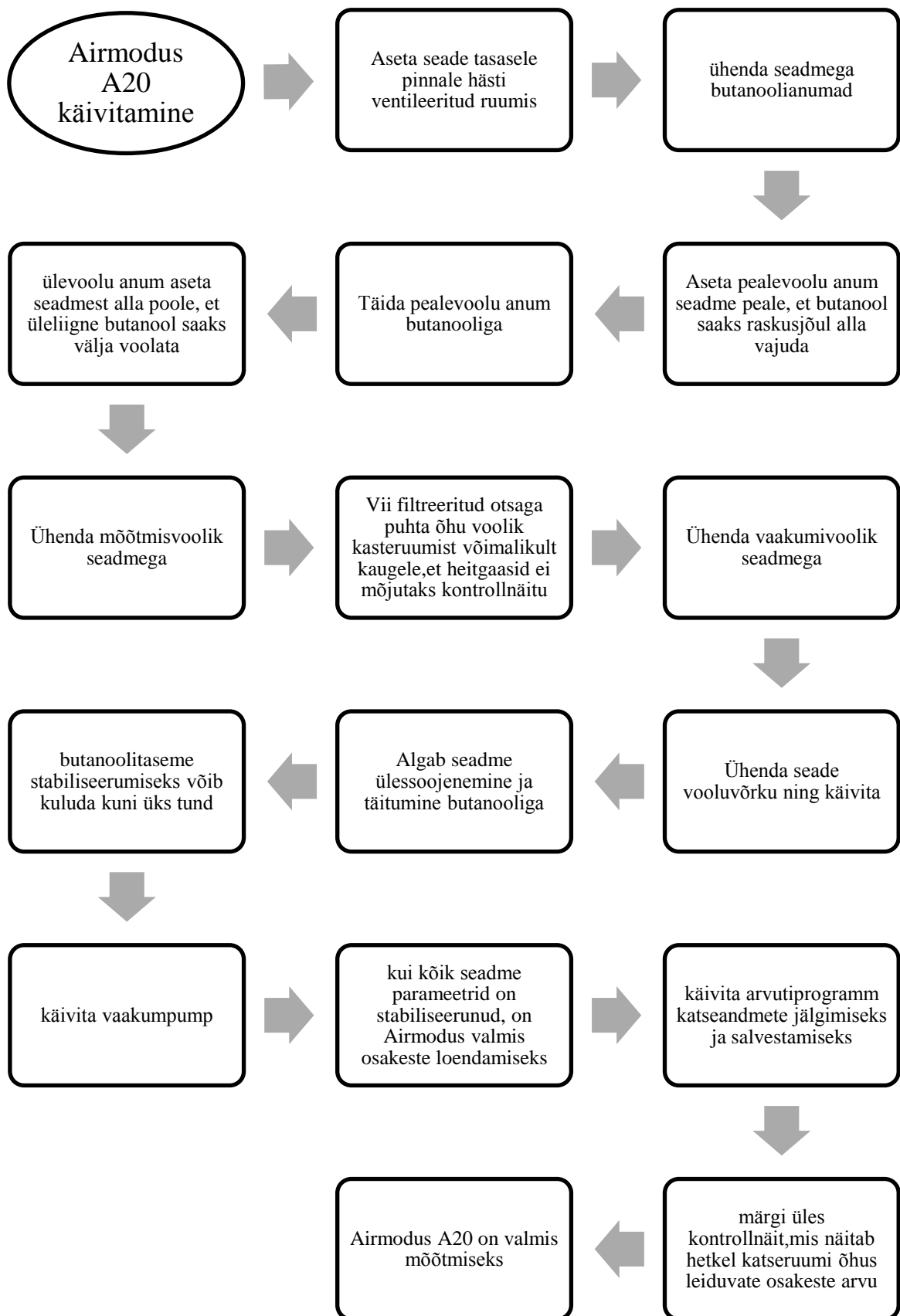


Joonis 14. Vooluhulga regulaator pealt ja külgvaates

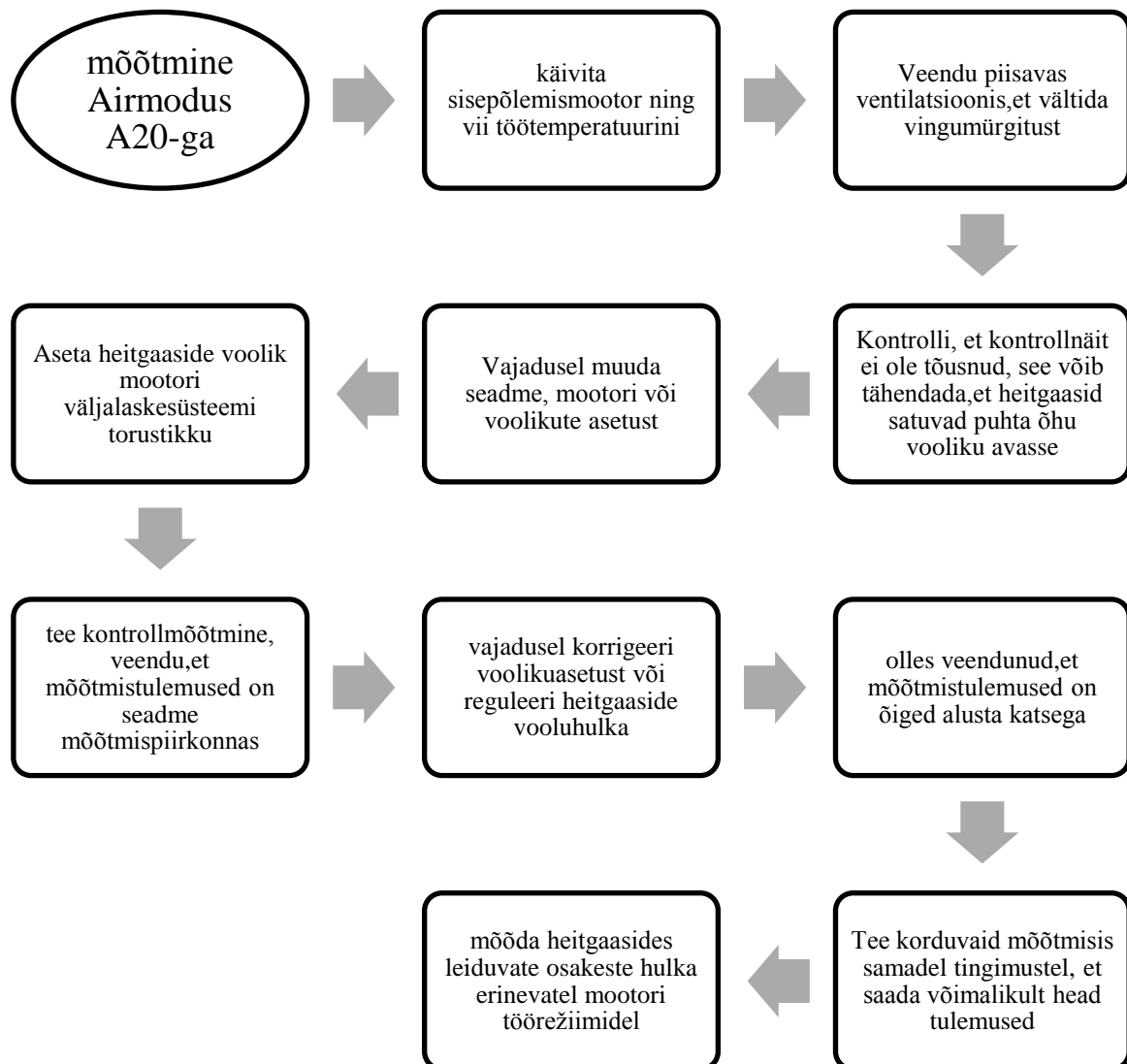
Heitgaasivoolu läbi regulaatori (**joonis 14**) on võimalik vähendada keerates regulaatoril asetsevat kraani vastupäeva. **Lisas 3** leitava tabeli põhjal on koostatud graafik (**Lisa4**), mis kirjeldab vähenenud vooluhulka läbi regulaatori täielikult avatud olekust kuni peaaegu suletud asendini. Katseseadme PF7000 mõõtmispiirkonnast tulenevalt polnud võimalik täielikult mõõta regulaatori poolt piiratud vooluhulka, mille tõttu on kirjeldatud vooluhulga vahemik suurimast võimalikust kuni hetkeni, mil polnud võimalik enam mõõtmistulemusi saada. Heitgaasi mõõtmisi läbi viies tuleb eelnevalt valida sobi lahjendus regulaatori kraani keerates. Sobilik lahjendus tuleb valida nii, et mõõdetud osakeste hulk ei väljuks seadme Airmodus A20 mõõtmispiirkonnast. Hiljem on võimalik täpne lahjendus välja arvutada, kasutades **lisades 3 ja 4** olevat tabelit ning graafikut.

2.5 Metoodiline juhend katsete läbiviimiseks Airmodus A20 osakesteloenduriga

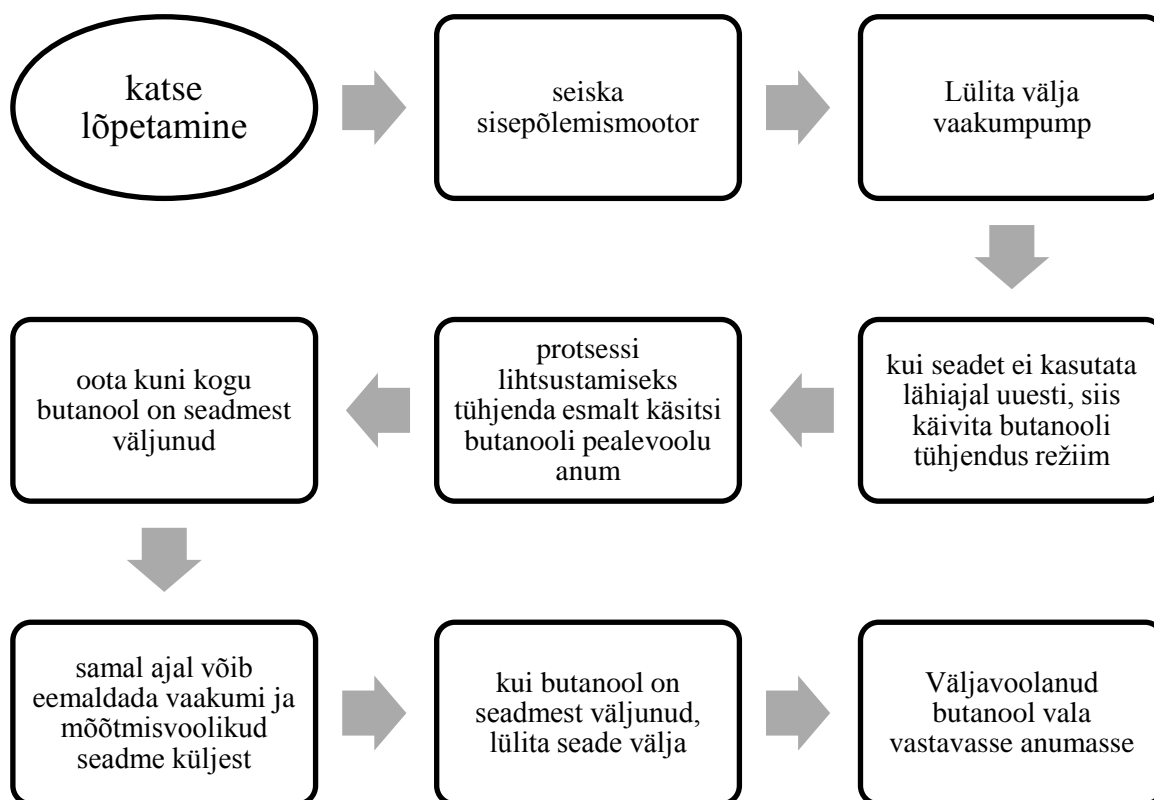
Mootorikatsete läbiviimiseks Tutvuti lähemalt seadmega Airmodus A20 ning töötati välja katsetametoodika heitgaasides leiduvate osakeste arvu mõõtmiseks antud seadmega. Mootorikatsetele eelnevalt projekteeriti vajalikud lisaseadmed, mis võimaldasid kasutada Airmodus A20 osakesteloendurit sise põlemismootorite heitgaasides leiduvate osakeste arvu mõõtmiseks. Lisaks neile sammudele on oluline, et oleks ka metoodika, kuidas katseid läbi viia. Järgnevatel plokkskeemidel on toodud plokkidena vajalikud sammud, mida igas katse etapis läbida. **Joonisel 15** on kirjeldatud vajalikud tegevused seadme Airmodus A20 käivitamiseks ja katsevalmendamiseks. **Joonisel 16** on kirjeldatud metoodilised sammud mõõtmaks antud osakesteloenduriga heitgaasides leiduvate osakeste arvu. Katsejärgsed toimingud on kirjeldatud **Joonisel 17**.



Joonis 15. Seadme Airmodus A20 käivitamiseks vajalike toimingute plokk skeem.



Joonis 16. Metoodika plokk skeem heitgaasis leiduvate osakeste arvu mõõtmise seadmega Airmodus A20



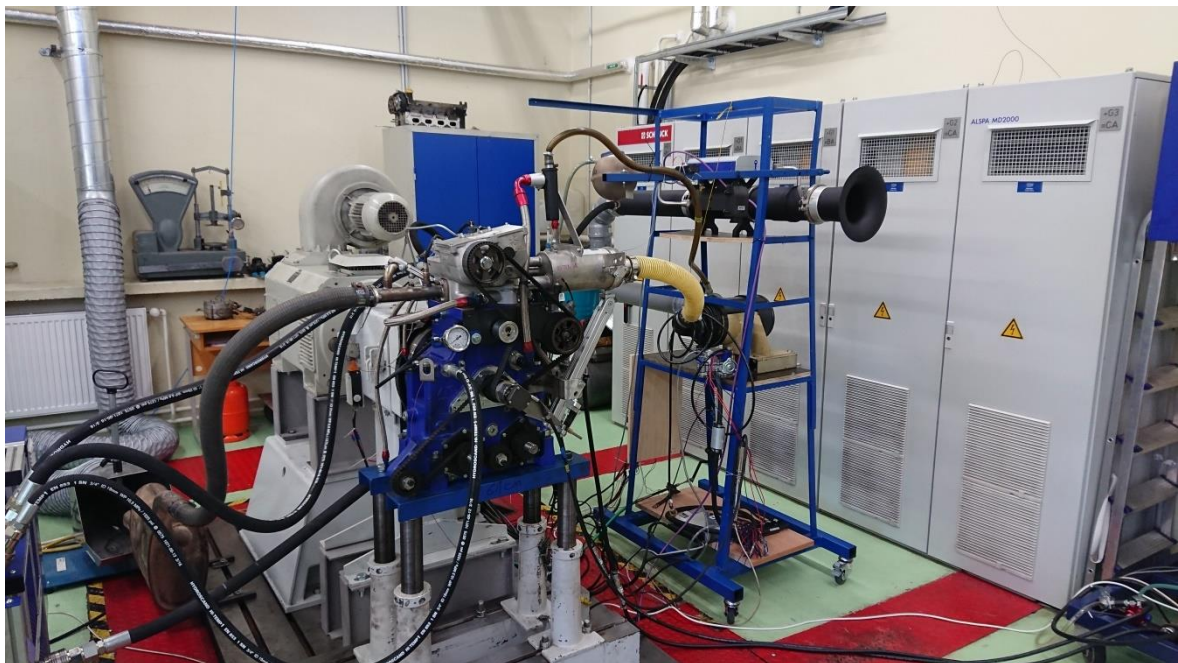
Joonis 17. Katsejärgsed toimingud seadmega Airmodus A20

Heitgaasides leiduvate osakeste arvu mõõtmiste läbi viimiseks välja töötatud meetodika kirjeldamiseks sai koostatud plokkskeemid, mis võimaldab katseid läbi viies hõlpsasti järgida meetodikajuhendit. Skeem annab autori arvates parema ülevaate järgnevatest sammudest, ilma, et peaks liialt süüvima pikka teksti.

3. MOOTORIKATSETUSTE ANDMED JA NENDE ANALÜÜS

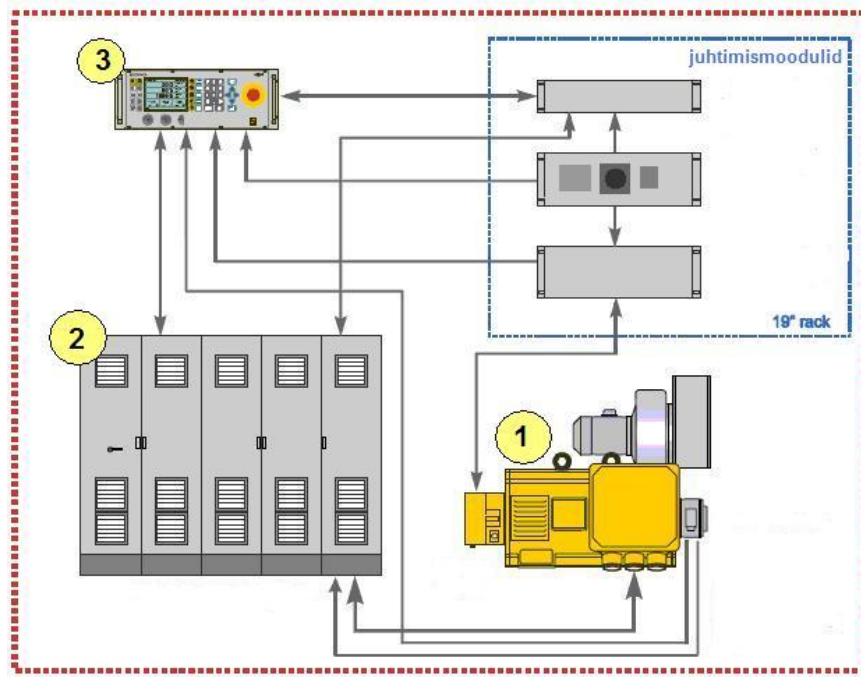
3.1 Katse ettevalmistamine

Projekteeritud heitgaaside lahjendussüsteemi ja Airmodus A20 osakesteloenduri koostu toimimiseks sai korraldatud mootorikatse Eesti maaülikooli mootorite katselaboris. Katsed viidi läbi survesüütega ja ühisanum toitesüsteemiga etalonmootoril AVL (**joonisel 18**), mille spetsifikatsioonid on leitavad tabelist käesoleva töö **lisas 1**.



Joonis 18. Etalonmootor koos mootori katsestendiga EMÜ mootorite katselaboris

Mootorikatsed viidi läbi kolme erineva mootorikütusega ning erinevatel koormustel. Kütustena kasutati diislikütust, hüdrogeenitud taimeõli (HVO) ning Rasvhapete metüülestreid (FAME). Mootori parameetrite mõõtmiseks ning koormamiseks kasutati mootorite katsestendi Schenck Dynas3 LI250 (**joonis 19**), millega on võimalik mõõta pöördemomente kuni 650 Nm, mootori pidurdusvõimsusega 250 kW, maksimaalselt 12000 p/min pöörlemissageduse juures. [5]



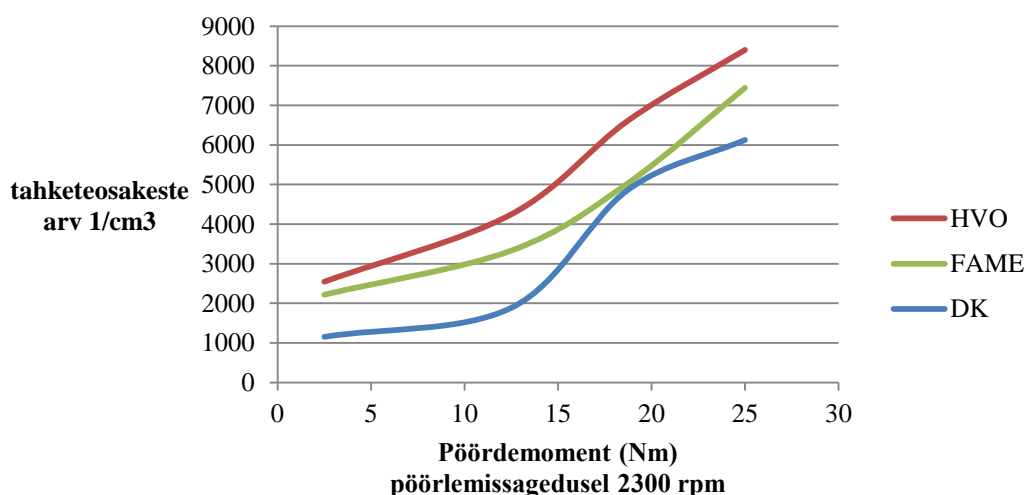
Joonis 19. Mootorite katsestendi komponentide skeem 1- asünkroonmootor, 2- Sagedusmuundur, 3- Stendi juhtseade [5]

Dynas3 LI250 katsestend on mõeldud mootorite katsetamiseks, koormamiseks ja diagnoosimiseks. Lisaks võimaldavad lisaseadmed suure täpsusega mõõta sisepõlemismootorite sisend- ja väljund parameetreid. [5] Sisuliselt pannakse pöörlema asünkroonmootor (1), mille töötades tekib staatoris takistav magnetväli, mille tugevust ja seeläbi ka koormust, saab juhtida sagedusmuunduriga (2).[6] Mõõtmiste käigus teostati mootori koormuskarakteristik väntvõlli pöörlemissagedusel 2300 p/min ja koormustel: 10%, 50%, 75% ja 100%.

3.2 Katseandmed

Sisepõlemismootorit koormati katse ajal kõigi kolme kütuse puhul võrdsel määral: 10%, 50%, 75% ja 100%. Mootoritööd mõjutavad parameetrid nagu näiteks temperatuur ja rõhk nii laboris kui ka mootoris sees hoiti katsete vältel stabiilsetena, mis tagas kõigi kolme kütuse puhul võrreldavate katseandmete kogumise. Katseandmetest koostatud tabeli (**Lisa 2**) põhjal koostatud graafik **joonisel 20** Kujutab diislikütuse, HVO ja FAME kasutamisel mõõdetud tahkete osakeste osakaalu (**15**) rakendades koormust etalonmootorile. Katse viidi läbi erinevatel koormustel samade mootoripöörete juures, milleks oli 2300 p/min (**1**).

Etalonmootori heitgaaside tahked osakesed erinevatel pöördemomentidel



Joonis 20. Etalonmootori heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arv (vertikaalteljel) erinevatel pöördemomentidel mootori pöörlemissagedusel 2300 rpm (horisontaalteljel) kolme erineva mootorikütuse puhul.

Katseandmete graafikust selgub, et loendades ainult tahkete osakeste arvu, tekitab diislikütus kõige vähem osakesi, võrreldes biokütuste tekitatud osakeste arvuga. Kuna katse toimus täpselt samal mootoril ja sarnastel katsetingimustel, kus muudeti vaid kasutatavat kütust, siis on ka kolme joone tõus graafikul sarnane. Joonte tõus kirjeldab seda, kuidas suurendades koormust, vajab mootor rohkem kütust (**11**), et säilitada etteantud pöörlemissagedust. Suurendatud koormuse ja kütuse tarbimise tõttu suureneb ka

tahmaosakeste tekkimine heitgaasides(15). Tahmaosakeste arvu suurenemisele koormusel avaldab kindlasti ka mõju see, et mõõdetud õhukulu(8) suurenenud kütusekulu korral hoopis vähenes. Esimeses peatükis käsitletud teemades selgus, et diiselmootorite heitgaaside üheks liigse tahmasuse põhjuseks on just nimelt hapnikuvaeses keskkonnas toimuv põlemisprotsess. Samal pöörlemissageduse säilitamiseks koormuse korral peab mootor tekitama suurema pöördemomendi (2), mis oleks tekitatud koormusega võrdne. Katsestendil mõõdetud pöördemomendi (2) ja mootori pöörlemissageduse (1) põhjal on võimalik **valemiga 3.1** välja arvutada mootori tekitatud võimsus P_e (13) antud koormuse ületamiseks.

$$P_e = \frac{n_e \cdot T_e}{9550} \quad (3.1)$$

Kus P_e on sisepõlemismootori võimsus kW,

N_e – mootori pöörlemissagedus p/min,

T_e – mootori pöördemoment Nm.

Eelpool mainitud suurenenud kütusekulu saab väljendada ka kütuse erikuluna (14), mis väljendab, mitu grammi kütust kulub ühe kilovatt-tunni kohta. Kütuse erikulu on arvutatav **valemiga 3.2**. Mis kasutab mõõdetud kütusekulu (11) ja arvutatud võimsust (13).

$$b_e = \frac{1000 \cdot B_f}{P_e} \quad (3.2)$$

Kus b_e – kütuse erikulu g/kWh,

B_f – kütusekulu kg/h,

P_e – mootori võimsus kW.

Kogutud katseandmeid võrreldi teiste sarnaste teaduslike töödega sisepõlemismootorite heitgaasides leiduvate osakeste hulga mõõtmise vallas. Analüüsitud tööde hulgas võis leida sarnasusi autori poolt koostatud katsega. Mõõtmistulemused vastavad maailmas üldtuntud teadmistele, et biokütuste kasutamisel tahmaosakeste arv kasvab. [20]

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö raames on välja töötatud tehniline lahendus, et mõõta Eesti Maaülikooli mootorite katselaboris sisepõlemismootorite heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu. Töö sisuline osa algab sisepõlemismootorite teooria ning tööpõhimõtete kirjeldusega. Analüüsitakse Otto- ja diiselmootorite heitgaaside tekke põhjuseid ning meetmeid nende vähendamiseks väljalaske süsteemist väljudes. Tahmaosakesed on samuti üheks heitgaaside osaks ja käesoleva töö eesmärgiks oli välja töötada tehniline lahendus heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu mõõtmiseks. Selle eesmärgi jaoks oli vaja kohandada mootorite katselaboris olemas olev Airmodus A20 osakesteloendur. Eesmärgi saavutamiseks tutvuti esmalt lähemalt seadmega Airmodus A20 ning viidi sisepõlemismootoritel läbi rida eelkatsetusi. Eelkatsetuste põhjal projekteeriti ning konstrueeriti vajaliku süsteemi prototüüp, mis võimaldaks Airmodus A20 kasutamist heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu mõõtmiseks. Kohandamine seisnes eelkõige selles, et heitgaasides leiduvate osakeste arvu mõõtmiseks oli vaja heitgaasid eelnevalt piisaval määral õhuga lahjendada. Lahjenduse läbi viidi tahkete osakeste osakaal mõõdetavas heitgaasis piisavalt madalale, et mõõtmistulemused jääksid AirmodusA20 mõõtmisvahemikku. Järgnevatel katsetustel töötati välja lõplik lahendus, millega oli võimalik mõõta heitgaasides leiduvaid tahkete osakeste arvu. Kohandatud süsteemile töötati välja vastav katsemetoodika, millele vastavalt viidi läbi katsed sisepõlemismootoril. Kasteandmeid analüüsiti ja kõrvutati teiste sarnaste katsetega, mille käigus kinnitati, et välja töötatud lahendus ning meetoodika on sobilik sisepõlemismootorite heitgaasides leiduvate tahkete osakeste arvu mõõtmiseks. Kohandatud Airmodus A20 osakesteloendurit ja väljatöötatud katsemetoodikat saab edaspidi kasutada Eesti Maaülikooli mootorite katselaboris katsete läbi viimisel. Tulevikus on võimalik välja töötatud süsteemi veelgi täiustada, mis muudaks osakeste loendamise kasutajasõbralikumaks ja võimaldaks veelgi täpsemaid mõõtmistulemusi.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Airmodus Ltd.** AIRMODUS A20 bCPC USER MANUAL Ref. A13TD0011 Version 1.7
Document date: 31.05.2016 © Airmodus. Airmodus A20 kasutusjuhend.
2. **Arcoumanis C., Kamimoto T. (ed.).** (2009) Flow and combustion in reciprocating engines. Berlin. Springer. 420 lk,
3. **Burtscher Heinz, W. Addy Majewski, Imad A. Khalek** (2016). PM Measurement: Collecting Methods [e-artikkel] https://www.dieselnet.com/tech/measure_pm_col.php (15.05.2018)
4. **Eesti Füüsika Selts**, Tahmasisalduse mõõtmine õhus. [e-õpik] <http://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/8743> (15.05.2018)
5. **Eesti lennuakadeemia** Mootorite katselabor- seadmed [veebileht] <http://www.eava.ee/opiobjektid/mkl/mkl2/seadmed.html> (15.05.2018)
6. **Eesti lennuakadeemia** Mootorite katselabor- teooria [veebileht] <http://www.eava.ee/opiobjektid/mkl/mkl2/teooriat.html> (15.05.2018)
7. **Eesti lennuakadeemia.** 1. Mootorite liigitus ja tähtsus [veebileht] <http://www.eava.ee/opiobjektid/mkl/ehitus08/index.html> (15.05.2018)
8. **Eesti lennuakadeemia.** Kolbmootorid ja propellerid [veebileht] http://www.eava.ee/opiobjektid/mkl/teooria08/82_plemisteeooria.html (15.05.2018)
9. **Eesti lennuakadeemia.** VI Mootori tööteooria alused [veebileht] http://www.eava.ee/opiobjektid/mkl/lennujaamatehnika08/61_mootorite_liigitus.html (15.05.2018)
10. **Halderman James D..** (2016) Automotive fuel and emissions control systems. Boston. Pearson 458 lk
11. **Ivand, J.** Sisepõlemismootorid. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus, 543 lk
12. **Kraas M. Carfox OÜ** Auto väljalaskesüsteem – töökord ja tüüpilised probleemid (2016) [e-artikkel] <https://carfox.ee/wp-content/uploads/2016/07/katal%C3%BCsaator-min.jpeg> (15.05.2018)
13. **Laanelepp M.** 2014. Tehniline lahendus pulverisaatoritoitesüsteemi kasutamiseks hargpritsena. Magistritöö. Eesti Maaülikooli tehnikainstituut. Tartu. 57 lk https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/1705/Mart_laanelepp_MA2014.pdf?sequence=2&isAllowed=y
14. **Maitene OÜ** (2013) Ausalt heitgaasidest [e-artikkel] <http://www.maitene.ee/index.php/et/artiklid/ausalt-heitgaasidest> (15.05.2018)

15. **Richard van Basshuysen, Fred Schäfer (Hrsg.).** (2015) Handbuch Verbrennungsmotor : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Wiesbaden : Springer Vieweg. 1232lk.
16. * **Sendyka B., Noga, M.** Combustion Process in the Spark-Ignition Engine with Dual- Injection System. Advances in Internal Combustion Engines and Fuel Technologies. 2013. Lk 54 Viidatud: **Laanelepp Mart.** 2014. Tehniline lahendus pulverisaatoritoitesüsteemi kasutamiseks hargpitsena. Magistritöö. Eesti Maaülikooli tehnikainstituut. Tartu. 57 lk vahendusel
17. **Sotsiaalministeerium.** Kemikaalimaailm [veebileht] <http://kemikaalimaailm.sm.ee/kemikaalid/susinioksiid.html> (15.05.2018)
18. **Taskutark** Reaktiivmootor [veebileht] <https://www.taskutark.ee/m/reaktiivmootor/> (15.05.2018)
19. **W. Addy Majewski, Hannu Jääskeläinen** (2013) Smoke Opacity [e-artikkel] https://www.dieselnet.com/tech/measure_opacity.php (15.05.2018)
20. **Meisam Ahmadi Ghadikolaiea, , Chun Shun Cheunga, Ka-Fu Yung.** (2018). Study of combustion, performance and emissions of diesel engine fueled with diesel/biodiesel/alcohol blends having the same oxygen concentration. - Energy [e-artikkel]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218310090> (25.05.2018)

LISAD

Lisa 1. Tabel 1. Survesüütega etalonmootori AVL tehnilised spetsifikatsioonid.

Tehniline parameeter	Väärtus	Ühikud
Silindri läbimõõt	85	mm
Kolvikäik	90	mm
Silindri töömaht	510	cm ³
Suurim pöörlemissagedus	4200	p/min
Suurim silindrirõhk	170	bar
Suurim indikaatorrõhk 2300 p/min juures	14	bar
Suurim võimsus	19	kw
Surveaste	17:1	-

Lisa 2. Tabel 2. Koormuskatse andmed diislikütuse, HVO ja FAME kasutamisel

			DK				HVO				FAME			
	Mõõtepunkt		5	6	7	9	5	6	7	9	5	6	7	9
Jrk nr	Koormus %		100	75	50	10	100	75	50	10	100	75	50	10
1.	n_e	p/min	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
2.	T_e	Nm	25	18,75	12,5	2,5	25	18,75	12,5	2,5	25	18,75	12,5	2,5
3.	t_{env}	°C	21,7	22,2	22	19,8	22,1	22,6	22,8	22,8	21,2	22	22,1	22,1
4.	φ_{env}	%	24	24	24	24	24	24	24	24	25	24	24	24
5.	t_e	°C	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
6.	t_{oil}	°C	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
7.	p_{oil}	bar	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
8.	B_a	kg/h	31	31,73	33,28	33,61	31,73	32,11	33,15	33,12	32,92	34	34,53	34,5
9.	t_{fuel}	°C	23,0417	23,805	24,407	24,6499	25,0004	25,245	25,4572	25,5368	27,8969	27,7816	27,7235	27,564
10.	η_{fuel}	kg/m3	832,56	831,645	831,101	830,904	775,733	775,342	774,98	774,84	873,462	874,554	874,704	874,913
11.	B_f	kg/h	2,457	1,51313	1,08651	0,60715	2,49399	1,50653	1,0344	0,56331	2,3119	1,67728	1,19015	0,69274
12.	t_{egt}	°C	602	550	419	251	602	551	412	243	590	522	398	247
13.	P_e	kW	6,0	4,5	3,0	0,6	6,0	4,5	3,0	0,6	6,0	4,5	3,0	0,6
14.	b_e	g/kW h	408,076	335,081	360,909	1008,4	414,219	333,619	343,599	935,589	383,976	371,432	395,336	1150,55
15.	PM	1/cm ³	6127,34	4869,29	1886,72	1154,38	8399,75	6618	4248,04	2546,5	7443,1	5038,68	3332,38	2218,18

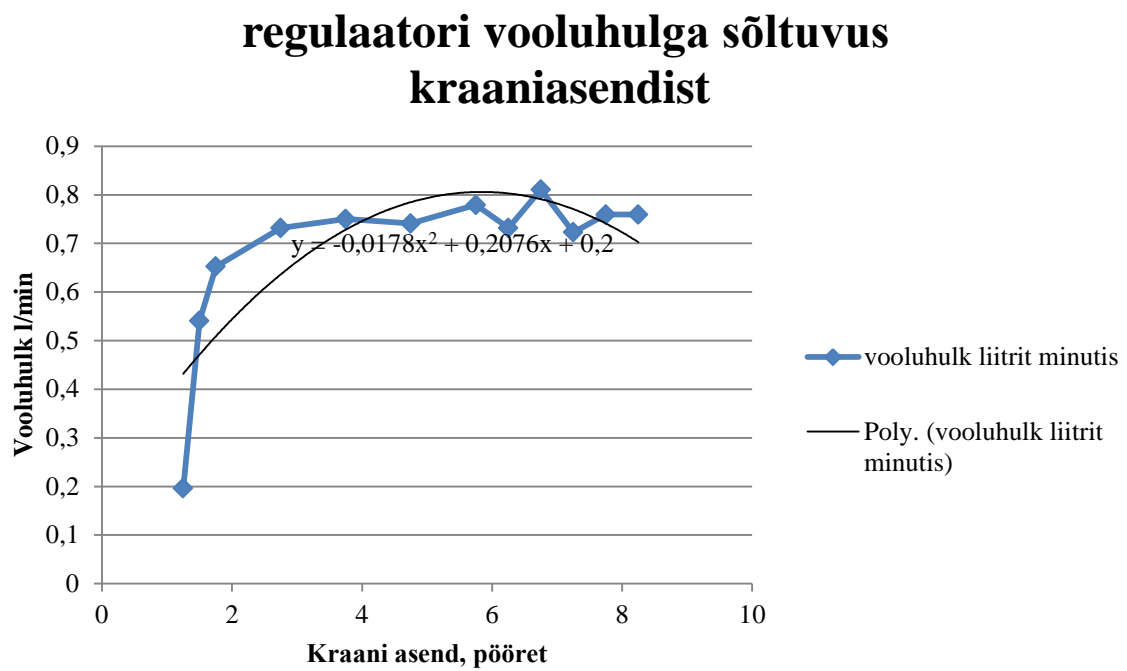
p/min

Märkused: n_e – Mootoripöörlemissagedus, T_e – Pöördemoment, t_{env} – Keskkonna temperatuur, φ_{env} – Õhuniiskus, t_e – Mootori temperatuur, t_{oil} – Mootoriõli temperatuur, p_{oil} – Õlirõhk, B_a – Õhukulu, t_{fuel} – Kütuse temperatuur, η_{fuel} – Kütusetihedus, B_f – Kütusekulu, t_{egt} – Heitgaaside temperatuur, P_e – Mootori võimsus, b_e – Kütuse erikulu, **PM** – tahkete osakeste arv

Lisa 3. Tabel 3. Regulaatori vooluhulga mõõtmistulemused erinevatel asenditel

jrk. nr.	kraani asend täispööretes	kommentaar asendimuudu kohta	0.1 dm ³ voolamiseks kulunud aeg minutites				keskmine aeg (min)	vooluhulk liitrit minutis
1	8,25	regulaator täielikult avatud	1:22	1:16	1:18	1:21	1:19	0,759493671
2	7,75	pool pööret kinni	1:28	1:19	1:15	1:17	1:19	0,759493671
3	7,25	pool pööret kinni	1:22	1:24	1:25	1:24	1:23	0,722891566
4	6,75	pool pööret kinni	1:17	1:02	1:16	1:23	1:14	0,810810811
5	6,25	pool pööret kinni	1:24	1:25	1:17	1:23	1:22	0,731707317
6	5,75	täis pööre kinni	1:18	1:25	1:24	1:02	1:17	0,779220779
7	4,75	täis pööre kinni	1:18	1:18	1:24	1:24	1:21	0,740740741
8	3,75	täis pööre kinni	1:28	1:21	1:16	1:17	1:20	0,75
9	2,75	täis pööre kinni	1:27	1:03	1:32	1:27	1:22	0,731707317
10	1,75	veerand pööret kinni	1:27	1:32	1:33	1:37	1:32	0,652173913
11	1,5	veerand pööret kinni	1:47	1:48	1:52	1:59	1:51	0,540540541
12	1,25	veerand pööret kinni	2:15	2:24	2:44	2:52	2:33	0,196078431

Lisa 4. Regulaatori vooluhulga vähenemine vastavalt kraani asendile.



Joonis 1. Regulaatorit läbiva vooluhulga (vertikaalteljel) sõltuvus kraaniasendist (horisontaalteljel) koos tunnusjoont kirjeldava trendijoone ja funktsiooniga.

Lisa 5. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____,
(*autori nimi*)

sünniaeg _____,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

_____,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on _____,
(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)